



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FINAL DE GRADO

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ESTUDIO DE EFICIENCIA TÉRMICA SOBRE FACHADAS DE  
EDIFICIOS EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS MEDIANTE  
DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.**



**Memoria i Annexos**

**Autor:** Ruben Gómez Freijo  
**Director:** Alfredo Guardo Zabaleta  
**Convocatoria:** Octubre 2017



## Resum

L'objectiu principal d'aquest treball es realitzar un estudi d'independència de malla, per la simulació mitjançant mecànica de fluids computacional, a un sistema de doble façana vidriada amb col·lectors solars integrats. Aquests col·lectors estan formats per un tub de vuit i una superfície reflectant.

L'ús de façanes dobles vidriades a climes mediterranis comporta un increment en les carregues solars que captura l'edifici. El calor generat per la radiació solar queda atrapat a l'interior de la façana per efecte hivernacle. Això es problemàtic inclòs al hivern per alguns casos, augmentant els costos de climatització de l'interior de l'edifici. Apareix llavors la necessitat de reconduir aquest calor cap a un lloc on pugui ser eliminat o fins i tot aprofitat.

Un cop proposat el disseny, es creen les geometries necessàries per generar les malles. Posteriorment, son avaluades executant simulacions definides per comprovar la seva validesa. Com a resultat obtenim un conjunt d'operacions de malla que en permetran mallar el model complet.

## Resumen

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio de independencia de malla, para la simulación mediante mecánica de fluidos computacional, en un sistema de doble fachada acristalada con colectores solares integrados. Los colectores están formados por un tubo de vacío y una superficie reflectora.

La utilización de fachadas dobles acristaladas en climas mediterráneos provoca un incremento de las cargas solares que captura el edificio. El calor recibido de la radiación solar queda atrapado en el interior de la fachada debido al efecto invernadero. Esto es problemático incluso en invierno para algunos casos, generando un aumento en los costes de climatización del interior del edificio. Aparece aquí la necesidad de reconducir el calor hacia un lugar donde pueda ser eliminado o incluso aprovechado.

Una vez propuesto el diseño, se crean las geometrías necesarias para generar las mallas. Posteriormente, se evalúan ejecutando simulaciones definidas para comprobar su validez. Como resultado obtenemos un conjunto de operaciones de malla que nos permiten mallar el modelo completo.

## **Abstract**

The main objective of this work is to carry a study of mesh independency, for simulation by means of computational fluid mechanics, in a system of double glazed facade with integrated solar collectors. The collectors are formed by a vacuum tube and a reflective surface.

The use of double glazed facades in Mediterranean climates causes an increase in solar captured by the building. Heat received from solar radiation is trapped in the interior of the façade due to greenhouse effect. This issue is undesirable even in winter for some cases, because generates an increase of air conditioning costs on the interior of the building. Then appears the need to redirect the heat to a place where it can be removed or even taken advantage of.

Once proposed the design, geometries are created in order to generate the meshes. Afterwards, meshes are evaluated by running defined simulations to verify its validity. As a result, we obtain a set of operations that allow us to mesh the complete model.

## Glosario

- CFD

Del inglés Computed Fluid Dynamics. La Mecánica de Fluidos Computacional es la ciencia encargada de hallar una solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluido en un dominio espacial y temporal. Entre ellos, ANSYS®

- CAD:

Del inglés Computer-Aided Design. Conjunto de herramientas de diseño que asisten a ingenieros y arquitectos. Entre ellos, Solidworks®.

- DFA: Doble fachada acristalada.

- ACS: Agua caliente sanitaria.

- Inflation:

Operación de mallado que permite la creación de capas de elementos paralelas a la superficie.

- Sizing:

Operación de mallado que permite controlar el tamaño de divisiones de los ejes del modelo.

# Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
GLOSARIO	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE ECUACIONES	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
<b>1. PREFACIO</b>	<b>10</b>
1.1 Origen del Trabajo	10
1.2 Motivación	10
1.3 Requerimientos previos	10
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
2.1 Doble Fachada Acrystalada (DFA)	11
2.2 Objetivos del proyecto	13
2.3 Alcance del proyecto	13
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>14</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
4.1 Fenómenos Térmicos Principales	15
4.3 Colectores solares térmicos	18
4.4 Mecánica de fluidos computacional	22
<b>5. ESTUDIO PREVIO</b>	<b>29</b>
5.1 Análisis preliminar	29
5.2 Diseño propuesto	30
5.3 Simplificaciones adoptadas	31
5.4 Presentación de la Geometría	32
5.5 Parámetros constructivos	33
<b>6. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA</b>	<b>34</b>
6.1 Tubo interior	35
6.2 Tubo de vacío	43
6.3 Interior de la fachada	51
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>60</b>
<b>8. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
<b>PRESUPUESTO</b>	<b>66</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO A - OBTENCIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO B – GEOMETRÍA DEL REFLECTOR</b>	<b>70</b>



## Índice de ecuaciones

Ecuación 4.1.1-1 Ley de Fourier.....	15
Ecuación 4.1.2-1 Convección .....	16
Ecuación 4.1.3-1 Ley Stefan-Boltzmann .....	17
Ecuación 4.1.3-2 Irradiación .....	17
Ecuación 4.1.3-1 Ratio concentración .....	18
Ecuación 4.4.3-1 Número de Reynolds Flujo interior tubo .....	25
Ecuación 4.4.3-2 Ecuación $Y^+$ .....	25
Ecuación 4.4.3-3 Velocidad de Fricción.....	25
Ecuación 4.4.3-4 Coeficiente de fricción tuberías circulares .....	26
Ecuación 4.4.3-5 Número de Prandtl.....	26
Ecuación 4.4.3-6 Número de Grashoff.....	26
Ecuación 4.4.3-7 Número de Raileigh.....	26
Ecuación 4.4.3-8 Ecuación de energía .....	27
Ecuación 4.4.3-9 Conservación de masa .....	27
Ecuación 4.4.3-10 Conservación de momento.....	27
Ecuación 4.4.3-11 Tensor de velocidad .....	27
Ecuación 4.4.3-12 Viscosidad modelo Estándar $k-\epsilon$ .....	28

# Índice de figuras

Figura 4.1.1-1 Geyser Parnell, Auckland, New Zeland ( <a href="http://inhabitat.com/tag/double-skin-facade/">http://inhabitat.com/tag/double-skin-facade/</a> )	11
Figura 4.1.1-2 Centro Internacional de Medicina Avanzada ,Barcelona <a href="http://www.drballista.com/web/c_trabajo.htm">http://www.drballista.com/web/c_trabajo.htm</a> )	11
Figura 4.1.1-1 Representación de conducción (Fuente: <a href="http://www.wbdg.org">http://www.wbdg.org</a> )	15
Figura 4.1.2-1 Convección y conducción en un edificio (Fuente: <a href="http://www.wbdg.org">http://www.wbdg.org</a> )	16
Figura 4.1.3-1 Radiación placa plana (Fuente: <a href="http://www.commercialwindows.org/primer_intro.php">http://www.commercialwindows.org/primer_intro.php</a> )	17
Figura 4.3.1-1 Formas comunes de absorbedores en tubos de vacío (7)	19
Figura 4.3.1-2 Heat-pipe ( <a href="http://www.sunflower-solar.com/index.php?act=content&amp;scheduler_id=62">http://www.sunflower-solar.com/index.php?act=content&amp;scheduler_id=62</a> )	20
Figura 4.3.1-3 Colector parabólico compuesto ( <a href="http://www.linuo-ritter-international.com/es/preguntas-frecuentes/colectores-de-tubos-de-vacio/">http://www.linuo-ritter-international.com/es/preguntas-frecuentes/colectores-de-tubos-de-vacio/</a> ).	21
Figura 4.4.2-1 Desprendimiento de la capa limite ( <a href="http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Separation+of+Flow">http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Separation+of+Flow</a> )	23
Figura 4.4.2-2 Wall functions en Ansys Fluent	24
Figura 4.4.3-1 Geometría Fachada (Solidworks)	29
Figura 4.4.3-1 Fachada Colectores parabólicos compuestos (10)	30
Figura 4.4.3-1 Geometría de una posible fachada completa (Solidworks)	32
Figura 4.4.3-2 Geometría modulo fachada (Solidworks)	32
Figura 4.4.3-1 División Geometría Modelo (Fuente: Ansys Fluent)	34
Figura 4.4.3-1 Wireframe tubo interior (Ansys Meshing)	35
Figura 6.1.2-4 Sizing longitudinal	37
Figura 6.1.2-4 Sizing circunferencial	37
Figura 6.1.2-4 Mallado superficie entrada	37
Figura 6.1.2-4 Fallo inflation	37
Figura 6.1.5-1 Gráfico comparación de métodos (Inflation)	41
Figura 6.1.5-2 Aristas de las celdas en la superficie de salida (Ansys Meshing)	42
Figura 6.1.5-1 Wireframe Zona vacío (Ansys Meshing)	43
Figura 6.2.1-1 Sizing circunferencias tubo de vacío (Ansys Meshing)	44
Figura 6.2.1-2 Sizing longitudinal tubo de vacío (Ansys Meshing)	44
Figura 6.2.1-3 Inflation tubo de vacío (Ansys Meshing)	44
Figura 6.2.5-1 Temperaturas tubo de vacío (Ansys Fluent)	49
Figura 6.2.5-1 Interior de la fachada (Ansys Meshing)	51
Figura 6.2.5-2 Reflector y Contacto con zona vacío (Ansys Meshing)	51
Figura 6.3.2-1 Mallado lateral del Interior de la fachada (Ansys Meshing)	53
Figura 6.3.4-1 Interior de la fachada (nitrógeno) reducido	57
Figura 6.3.5-1 Gráfico elementos vs variables interior de la fachada	58
Figura 6.3.5-2 Contorno temperaturas tercer caso (FC=1)	59
Figura 6.3.5-3 Contorno temperaturas segundo caso (FC=1,2)	59
Figura 6.3.5-4 Contorno temperaturas caso inicial (FC=1,05)	59
Figura 6.3.5-1 Mallado final tubo interior	60
Figura 6.3.5-2 Mallado final tubo de vacío	61
Figura 6.3.5-3 Mallado final interior de la fachada	62

## Índice de tablas

Tabla 4.1.3-1 Tipos colectores solares (6) .....	18
Tabla 4.4.3-1 Parámetros constructivos cristales (12) .....	33
Tabla 4.4.3-2 Parámetros ópticos reflector.....	33
Tabla 4.4.3-3 Parámetros constructivos tubo de vacío .....	33
Tabla 4.4.3-1 dimensiones tubo interior.....	35
Tabla 6.1.1-1 Resumen datos agua tubo interior .....	36
Tabla 6.1.1-2 Cálculo inflation tubo interior .....	36
Tabla 6.1.2-1 Mallado tubo interior.....	37
Tabla 6.1.3-1 Modelos tubo interior .....	38
Tabla 6.1.3-2 Propiedades agua tubo interior .....	38
Tabla 6.1.3-3 Condiciones de contorno tubo interior .....	38
Tabla 6.1.3-4 Residuales tubo interior.....	39
Tabla 6.1.4-1 Casos sizing tubo interior.....	40
Tabla 6.1.4-2 Casos parámetro circunferencial tubo interior .....	40
Tabla 6.1.4-3 Casos parámetro longitudinal tubo interior.....	40
Tabla 6.1.5-1 Resultados inflation tubo interior .....	41
Tabla 6.1.5-2 Diferencia resultados entre modelos.....	41
Tabla 6.1.5-3 Resultado sizing circunferencial tubo interior.....	42
Tabla 6.1.5-4 Resultados sizing longitudinal tubo interior.....	42
Tabla 6.1.5-1 Dimensiones tubo de vacío.....	43
Tabla 6.2.1-1 Mallado tubo de vacío .....	44
Tabla 6.2.2-1 Datos flujo de agua.....	45
Tabla 6.2.2-2 Valores convección tubo de vacío.....	45
Tabla 6.2.3-1 Modelos tubo de vacío .....	46
Tabla 6.2.3-2 Propiedades vacío (aire) .....	46
Tabla 6.2.3-3 Calculador solar tubo de vacío.....	46
Tabla 6.2.3-4 Condiciones de contorno tubo de vacío.....	47
Tabla 6.2.3-5 Residuales tubo de vacío .....	47
Tabla 6.2.4-1 Casos Inflation tubo de vacío .....	48
Tabla 6.2.4-2 Casos parámetro circunferencial tubo de vacío.....	48
Tabla 6.2.4-3 Casos parámetro longitudinal tubo de vacío .....	48
Tabla 6.2.5-1 Resultados casos Inflation .....	49
Tabla 6.2.5-2 Comparación elementos contacto tubo interior-zona de vacío .....	50
Tabla 6.2.5-3 Resultados pruebas sizing tubo de vacío.....	50
Tabla 6.3.2-1 Mallado interior de la fachada.....	53
Tabla 6.3.3-1 Modelos interior de la fachada.....	54
Tabla 6.3.3-2 Propiedades nitrógeno .....	54
Tabla 6.3.3-3 Calculadora Solar .....	54
Tabla 6.3.3-4 Condiciones de contorno interior de la fachada .....	55
Tabla 6.3.3-5 Residuales interior de la fachada.....	56
Tabla 6.3.4-1 Casos factor de crecimiento interior de la fachada .....	57
Tabla 6.3.4-2 Casos factor de crecimiento interior de la fachada (módulo reducido) .....	57
Tabla 6.3.5-1 Resultados factor de crecimiento interior de la fachada .....	58
Tabla 6.3.5-2 Errores resultados diferentes casos factor de crecimiento Interior fachada .....	58
Tabla 6.3.5-1 Operaciones mallado final tubo interior .....	60
Tabla 6.3.5-2 Operaciones mallado final tubo de vacío.....	61
Tabla 6.3.5-3 Operaciones mallado final interior de la fachada .....	62

# 1. Prefacio

## 1.1 Origen del Trabajo

El siguiente estudio forma parte de la cátedra, universidad-empresa, UPC-J. G Ingenieros: "Estudi de la sostenibilitat aplicada a l'enginyeria de serveis dels edificis". Desde el 2008, el Centro de Diagnóstico Industrial y Fluidodinámica o CDIF (UPC) conjuntamente con el grupo J.G Ingenieros realiza proyectos de investigación y difusión de tecnologías relevantes desde el punto de vista de la sostenibilidad en la edificación (1). Entre sus publicaciones, destacamos los artículos relativos a fachadas acristaladas dobles (DGF).

## 1.2 Motivación

Desde pequeño me he sentido intrigado por saber cómo funcionan las cosas. Gracias al conocimiento que he ido adquiriendo a lo largo de los años, sobre todo durante la carrera, y al desarrollo en el campo de mecánica de fluidos computacional, junto con la evolución de los ordenadores, considero el análisis mediante CFD una herramienta perfecta para dar respuesta a todos esos "¿Y si?" de forma cuantitativa. A demás, considerando que se pueden realizar infinidad de pruebas, sin necesidad de construir un prototipo y con un coste de recursos prácticamente nulo, se abre un mundo de posibilidades a satisfacer ésta incertidumbre. Por ello, considero indispensable desarrollar mi conocimiento en éste campo y ser capaz de llegar a resultados fiables.

Si además con ello soy capaz de ayudar a reducir, aunque sea probablemente ingenuo, los efectos "nocivos" del inexorable aumento del consumo de energía por el ser humano, cada vez más relevantes en nuestra sociedad, nada me podría realizar más como individuo.

## 1.3 Requerimientos previos

La utilización de ANSYS (paquete de herramientas para el cálculo con elementos finitos, incluyendo fluido-dinámica computacional) es tremendamente compleja, las posibles configuraciones y metodologías de cálculo son innumerables. Por lo tanto, ha sido fundamental desarrollar este conocimiento previo del software para poder conseguir resultados significativos. Afortunadamente, hay disponible tanto un paquete de tutoriales como una infinidad de recursos online que ayudan a comprender y familiarizarse con el software. Cabe destacar que la experiencia y ayuda de mi tutor ha sido crucial.

## 2. Introducción

### 2.1 Doble Fachada Acristalada (DFA)

El consumo energético en edificios corresponde al 40% de la energía total consumida por la Unión Europea (1). Entre sus usos se incluye: calefacción, enfriamiento, iluminación, agua caliente sanitaria y ventilación. Por ello, existe este esfuerzo continuo en reducir dichos costes energéticos, buscando el funcionamiento sostenible acorde a la ley actual de la Unión Europea (2).

La fachada juega un papel crucial en las condiciones del interior de los edificios ya que son el nexo entre el interior y el entorno. Pérdidas de calor, radiación solar, lluvia, viento, ruido son algunos de los diferentes factores que alteran el confort interior. En los últimos años, se ha popularizado el uso de doubles fachadas acristaladas en edificios debido características como transparencia, durabilidad, aislamiento térmico y acústico y su capacidad de reducir el consumo energético (3), pero también porque refuerza la imagen corporativa del mismo. Se empezó a utilizar en países del norte de Europa, pero al tomar fuerza este tipo de construcciones en latitudes inferiores, donde por las condiciones geográficas las ganancias de calor son más elevadas, aparecen problemáticas debidas a sobrecalentamientos en el interior del edificio. Este hecho provoca un aumento en las cargas de los sistemas de climatización y por lo tanto en el consumo y coste de los mismos. Toma importancia entonces la idea de incluir en el interior de la fachada un sistema capaz tanto de disipar el exceso de calor como de aprovecharlo.



Figura 4.1.1-2 Centro Internacional de Medicina Avanzada, Barcelona  
[http://www.drballista.com/web/c\\_trabajo.htm](http://www.drballista.com/web/c_trabajo.htm)



Figura 4.1.1-1 Geyser Parnell, Auckland, New Zealand  
(<http://inhabitat.com/tag/double-skin-facade/>)

En general una DFA es, básicamente, una fachada compuesta de una piel, una cavidad (que puede ser ventilada o no) y una piel interior (3).

- Piel Exterior: es la primera barrera de protección con el exterior. Usualmente totalmente acristalada (vidrios simples con factor solar bajo) y con aberturas para permitir la ventilación de la entrepel.
- Piel Interior: tiene como objetivo principal aislar térmicamente el interior del edificio del espacio entre las dos pieles. Usualmente se emplean cristales dobles con baja emisividad y pueden presentar oberturas a la entrepel practicable por el usuario.
- Entrepel: su anchura puede variar entre los 20cm y los 2m, siendo este un parámetro crucial para el comportamiento del flujo interior. La ventilación de esta zona puede ser natural, forzada o una mezcla de ambas. Suelen integrarse sistemas de reducción de la carga solar como por ejemplo persianas de lamas horizontales.

Existe una amplia variedad de configuraciones. Las tres formas principales para clasificarlas son:

- Modo de ventilación de la entrepíel: diferentes direcciones de circulación del aire (entradas, salidas) en la cavidad propician efectos térmicos según las condiciones climatológicas y el resultado deseado.
- La naturaleza de la fuerza que impulsa el aire: puede ser por convección natural (efectos de flotabilidad), forzada por impulsores mecánicos o un híbrido de ambas.
- Compartimentación de la fachada: la compartimentación de la fachada (vertical y/o horizontal) permite controlar el recorrido del flujo de aire a lo largo la misma.

Diversos factores son analizados para conseguir la máxima eficiencia. Para alcanzar el objetivo propuesto, se utilizan diferentes estrategias como las siguientes (4):

- Flujo de calor y circulación del mismo

La incidencia de radiación solar es el componente predominante del calor entrante a través de la fachada, por ello es importante controlarlo. Las principales metodologías incluyen el uso de: tratamientos térmicos y transparencia de los cristales, ventilación forzada o natural y/o elementos que proporcionen sombra.

- Almacenamiento y reutilización de la energía

El uso de colectores solar en el interior de la fachada permite reconducir el calor entrante hacia el sistema de tuberías del edificio para ayudar al sistema de calefacción o ACS. Esto supone grandes ahorros a lo largo de todo el año ya que no solamente reduce las cargas de enfriamiento del sistema de aire acondicionado, sino que también calienta el edificio en invierno.

## 2.2 Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es realizar un estudio de ingeniería inversa, estudiando un sistema de captación solar integrado en una DFA.

La magnitud de un proyecto de esta índole es enorme. Por ello, nosotros nos centraremos únicamente en el estudio de dicho sistema mediante CFD. Para ello, será necesario:

- Objetivos previos:
  - Encontrar una solución que satisfaga (a priori) los requerimientos contemplados.
  - Generación de la geometría (mediante CAD) para su tratamiento posterior en el software de CFD.
  - Definición de los diferentes mecanismos de transferencia de calor implicados en el diseño.
  - Determinación de los parámetros constructivos necesarios para llevar a cabo la simulación.
- Obtención del mallado a partir de la geometría y estudiar de la validez del mismo.
- Simulación.
- Estudio de los resultados y la validez de los mismos.
- Postulación de conclusiones respecto a las posibilidades prácticas del diseño propuesto.

## 2.3 Alcance del proyecto

El proyecto pretende ser una prueba de concepto. Debido a la complejidad del proyecto, se realizará únicamente el estudio sobre un bloque reducido de la totalidad de la fachada. Esto significa que solo se valorará una parte de la fachada (módulo colector solar incluido en el doble acristalamiento y atmósfera interior). Se centrará en el aspecto de los fenómenos térmicos que se producen en su interior y, por lo tanto, se limitará a lo necesario para definir el escenario de la simulación.

### 3. Metodología

El destino de la instalación será en la fachada de un edificio del clima mediterráneo (orientación sur). Debe ser capaz de capturar la radiación solar y conducir el exceso de energía hacia un lugar dónde pueda ser eliminada o aprovechada. También debe permitir pasar la luz a través de él buscando minimizar su impacto visual.

Para realizar el estudio deberemos concretar el sistema a integrar en la fachada (estudio previo) realizar un modelo geométrico mediante CAD (Solidworks), transferir los resultados para el proceso de mallado y mallado (Ansys Meshing<sup>®</sup>) y ejecutar las simulaciones para el estudio de independencia (Ansys Fluent<sup>®</sup>).

Por lo tanto, los pasos necesarios para llevar a cabo el proyecto son:

- Establecer el marco teórico (Capítulo 4)
- Estudio y selección del diseño preliminar (Capítulo 5).
- Detalle de los fenómenos térmicos presentes (Capítulo 5).
- Estudio de la independencia de malla con resultados (Capítulo 6). Incluye mallado, modelado y estudio de independencia.
- Resultados (Capítulo 8).



## 4. Marco Teórico

### 4.1 Fenómenos Térmicos Principales

#### 4.1.1. Conducción

Definimos conducción como la transferencia de energía entre partes de una sustancia física. En los sólidos, la energía térmica se transmite como energía cinética a nivel atómico. El calor, fluye naturalmente desde zonas calientes, con alta energía cinética, hacia las zonas frías. Al calentarse una parte del material y se extraer calor de otra, se forma un gradiente térmico. Dicho gradiente es típicamente medido mediante una diferencia de temperaturas a través del material. La energía térmica transferida mediante este proceso se conoce como conducción térmica, mecanismo primario en sólidos, como por ejemplo en los materiales opacos de los edificios.

El flujo de calor a través de un material depende de diferentes magnitudes: la diferencia de temperaturas a través del material, su área, su grosor y la conductividad térmica del material. La conductividad térmica mide la capacidad del material para conducir calor. Para materiales de construcción o aislamientos generalmente se habla de resistencia térmica. Esta es simplemente el recíproco de la conductividad. Los códigos energéticos utilizan cada vez más valores de conductividad (U), en vez de los de resistencia (R), para sistemas cerrados.

La velocidad de transferencia de energía por conducción se puede calcular macroscópicamente por la ley de Fourier:

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

*Ecuación 4.1.1-1 Ley de Fourier*

donde el factor de proporcionalidad k, es la mencionada conductividad térmica. El signo menos es consecuencia de que la energía fluye en la dirección de las temperaturas decrecientes.

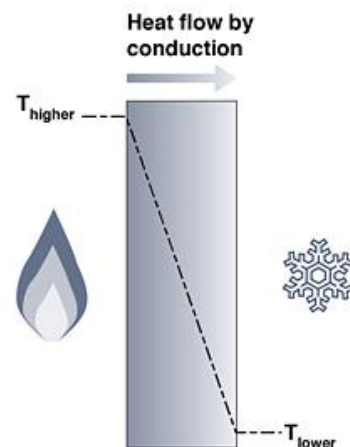


Figura 4.1.1-1 Representación de conducción (Fuente: <http://www.wbdg.org>)

### 4.1.2. Convección

Cuando existe movimiento relativo entre un sólido o fluido y un fluido a diferentes temperaturas se produce una transferencia de energía entre ellos. Este fenómeno es conocido como convección. La transferencia de calor se produce en el pequeño instante en el que el fluido o gas en movimiento se pone en contacto con la superficie del otro sólido o fluido. Por lo tanto, la convección es una forma de conducción.

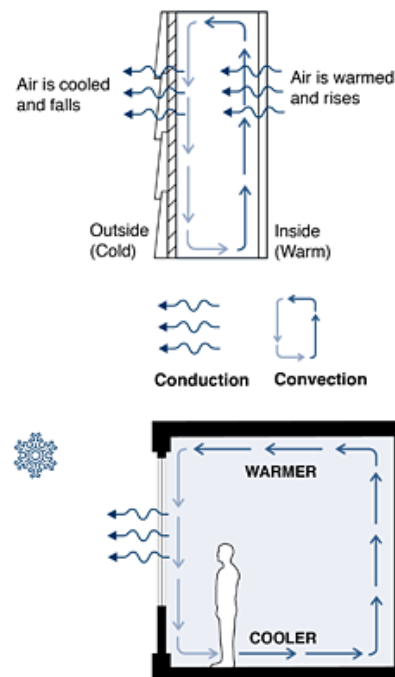
Como ejemplos, tenemos la convección natural, donde el movimiento se genera por efectos de flotabilidad (corrientes de aire caliente ascendentes) o la convección forzada donde el movimiento es generado por un elemento mecánico (ventilador o bomba). En la figura 4-2 vemos como el calor generado en la pared interna de los dos cerramientos se propaga hacia el fluido interior, creando una pequeña corriente que disipa el calor mediante convección natural hacia el exterior.

La velocidad de transferencia de calor desde el sólido al fluido puede calcularse con la expresión empírica siguiente:

$$\dot{Q}_c = h A (T_s - T_f)$$

*Ecuación 4.1.2-1 Convección*

Donde  $T_s$  corresponde a la temperatura de la superficie sólida,  $T_f$  a la temperatura del fluido lejos de la pared,  $h$  es una constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de transferencia de calor. Este último es un parámetro empírico dependiente de la naturaleza del modelo, las propiedades del fluido y la geometría del sistema. Su valor es generalmente más elevado cuando se produce una convección forzada respecto a la convección.



*Figura 4.1.2-1 Convección y conducción en un edificio (Fuente: <http://www.wbdg.org> )*

### 4.1.3. Radiación Térmica

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética continuamente. Dependiendo de su temperatura, intercambian energía con su entorno emitiendo o recibiendo este tipo de radiación. Se propaga por ondas, por lo tanto, no requiere de soporte para propagarse y puede tener lugar incluso en el vacío (Como por ejemplo la radiación proveniente del Sol). Diferentes temperaturas generan diferentes longitudes de onda. Así como por ejemplo el Sol al estar muy caliente radia ondas de amplitud corta, los objetos en la tierra relativamente mucho más fríos tienden a emitir ondas de amplitud larga. Esta distinción es particularmente importante ya que permite el uso de revestimientos de baja emisividad en ventanas, impidiendo tanto que el edificio emita calor hacia el exterior en invierno como que el exterior radie calor hacia el interior en verano.

La velocidad a la que la energía es emitida,  $\dot{Q}_e$ , desde un sistema con área superficial  $A$ , se puede calcular macroscópicamente mediante una forma modificada de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma A T_s^4$$

*Ecuación 4.1.3-1 Ley Stefan-Boltzmann*

que define la radiación térmica es función de la cuarta potencia de la temperatura absoluta en la superficie,  $T_s$ . La emisividad,  $\varepsilon$ , es una propiedad de la superficie que indica la eficiencia con que radia la superficie ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ), y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann.

#### 4.1.3.1. Irradiación

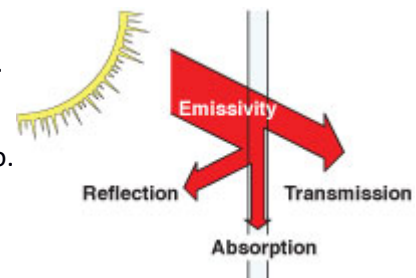
Como hemos mencionado anteriormente, todos los objetos emiten radiación, pero, ¿cómo afecta ésta a los demás objetos? Necesitamos definir el concepto de irradiación: energía de radiación incidente en una superficie. Dependiendo de la superficie, el comportamiento de la misma viene definido por tres factores que se resumen en la ecuación siguiente:

$$I = \alpha I + \pi I + \tau I$$

*Ecuación 4.1.3-2 Irradiación*

Como ejemplo, desglosando la radiación solar incidente en una placa:

- Proveniente del Sol, llega radiación hasta la superficie de la placa.
- Según el material y las propiedades ópticas de la placa, la radiación incidente se propaga en tres direcciones:
  - Parte es directamente reflejada hacia el exterior. Reflectividad ( $\pi$ )
  - Parte traspasa la placa y se transmite al otro lado. Transmitancia ( $\tau$ )
  - Parte incide directamente en la placa, siendo absorbida por la misma. Absortividad ( $\alpha$ )
- Además, la placa también emite radiación por lo que parte de la energía absorbida se perderá en esa dirección.



*Figura 4.1.3-1 Radiación placa plana*  
(Fuente:

[http://www.commercialwindows.org/pri mer\\_intro.php](http://www.commercialwindows.org/pri mer_intro.php))

### 4.3 Colectores solares térmicos

Un colector solar térmico es un tipo particular de intercambiador de calor. Su objetivo es absorber radiación solar convirtiéndola en energía térmica al transferirla a un fluido (típicamente aire, agua o aceite).

A grandes rasgos, diferenciamos dos tipos de colectores solares: estacionarios y móviles. Los no-concentradores tienen la misma área para la captación y absorción de la radiación solar, mientras que los concentradores aprovechan una superficie cóncava de reflexión para maximizar el flujo de radiación en el captador. Según el rango de temperaturas y el ratio de concentración encontramos diferentes ejemplos:

**Tabla 4.1.3-1 Tipos colectores solares (6)**

Movimiento	Tipo colector	Forma Colector	Ratio Concentración	Temperaturas de trabajo (°C)
Estacionario	Placa Plana (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubos Vacío (ETC)	Plano/Tubular	1	50-200
	Reflector Parabólico (CPC)	Tubular	1-5	60-240
Seguimiento en 1 eje	Lineal Fresnel (LFR)	Tubular	5-15	60-250
	Reflector Parabólico (PTC)	Tubular	10-40	60-300
	Reflector Cilíndrico (CTC)	Tubular	15-45	60-300
Seguimiento en 2 ejes	Disco Parabólico (PDR)	Puntual	100-1000	100-500
	Campo Helio-estático (HFC)	Puntual	100-1500	150-2000

Donde el ratio de concentración(C) se define como:

$$C = \frac{\text{Área del Colector}}{\text{Área de captación}}$$

*Ecuación 4.1.3-1 Ratio concentración*

### 4.3.1. Colectores de Tubos de Vacío(ETC)

Una serie de tubos de vacío colocados paralelamente constituyen la parte esencial de este tipo de colector. En cada tubo se ha generado el vacío, de este modo no se pierde el calor, por conducción y/o convección hacia el exterior. Este hecho lo convierte en el tipo de colector solar térmico más eficiente.

- **Tipos de tubos de vacío**

Para conseguir el vacío dentro del tubo, podemos utilizar una pared o doble pared. En el primer caso el vacío coloca entre el tubo externo y la captador. En cambio, en el segundo, se colocan dos tubos de vidrio concéntricos, cerrados por un extremo, entre los cuales se contiene el vacío.

Según el modo en el que se extrae el calor del tubo, encontramos:

- **Flujo directo**

En los tubos de flujo directo el fluido calor-transportador pasa por dentro del captador. Los tipos principales de captadores que encontramos son metálicos o full-glass.

Dentro de los metálicos, encontramos diferentes formas (7):

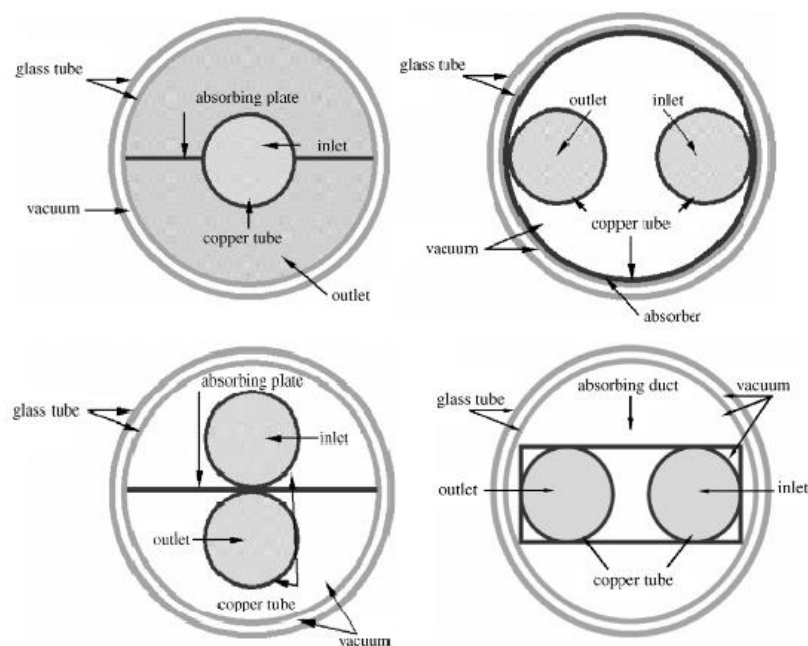


Figura 4.3.1-1 Formas comunes de absorbedores en tubos de vacío (7)

La forma geométrica afecta considerablemente al diseño debido a que se pueden generar sombras, disminuyendo la radiación incidente (tanto directa como difusa si están muy juntos). Si los tubos están considerablemente juntos, a lo largo de día el mejor es el modelo 3, debido a las sombras. En cambio, si están suficientemente separados el más eficiente es el modelo 2.

Para el caso de Full-glass (Sydney tube), la parte externa del tubo interior está tratada para captar la radiación, transfiriendo el calor por contacto directo hacia el agua. Es una opción popular por su bajo coste.

### ○ Heat-Pipe

Un tubo de cobre sellado, soldado a una placa o envuelto por una cobertura metálica con alta absorptividad, y que contiene un fluido capaz de cambiar de estado. Se coloca verticalmente, diferenciándose en dos partes: inferior (evaporador) y superior (condensador). Mediante convección natural, el vapor asciende hasta la parte superior del tubo, donde se enfría y vuelve por capilaridad al extremo inferior en forma líquida. El tramo superior, es introducido dentro de una tubería por donde circula el fluido calor-transportador (zona de condensación).

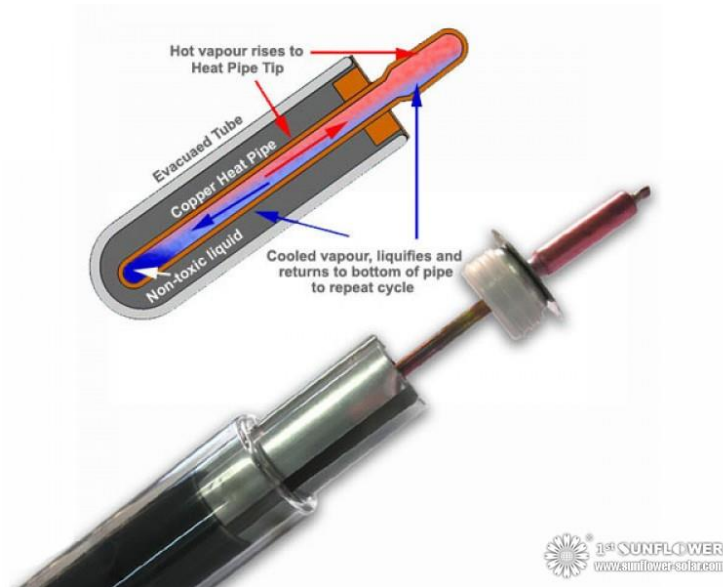


Figura 4.3.1-2 Heat-pipe  
([http://www.sunflower-solar.com/index.php?act=content&scheduler\\_id=62](http://www.sunflower-solar.com/index.php?act=content&scheduler_id=62))

### • **Ventajas y desventajas de los tubos de vacío**

#### ○ Ventajas

- Evita pérdidas por convección
- Soporta condiciones climáticas desfavorables.
- No se ensucia
- Trabaja con altas temperaturas

#### ○ Desventajas

- Coste
- Vida útil baja por pérdida de vacío
- Difícil integración
- Estéticamente cuestionado

- **Reflector Parabólico Compuesto(CPC)**

Los CPC son un tipo de colectores que combinan los tubos de vacío con una superficie reflectora para aumentar la radiación incidente (6). Se diferencian principalmente por su forma, y son aplicables acorde con el tipo de captador elegido. Un diseño particular es el conocido como Integrated Compound Parabolic Collector (ICPC). Éste utiliza tubos de vacío con una superficie reflectante en el fondo integrada dentro del tubo. La siguiente imagen es de una empresa comercializadora de este tipo de colectores (8).



Figura 4.3.1-3 Colector parabólico compuesto  
(<http://www.linuo-ritter-international.com/es/preguntas-frecuentes/colectores-de-tubos-de-vacio/>).



## 4.4 Mecánica de fluidos computacional

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) es la ciencia encargada de hallar una solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido. No existe una forma general de solucionar estas ecuaciones, todo y así, herramientas como la simplificación, análisis dimensional y experimentación permiten abordar estos estudios. El problema es que las soluciones obtenidas tienen limitaciones y/o no pueden reducirse lo suficiente para ser utilizadas como caso práctico en la ingeniería. Gracias a la evolución de los ordenadores, han aparecido nuevas técnicas de análisis haciendo uso de herramientas numéricas capaces de discretizar (paso de continuo a discreto) el dominio espacial y temporalmente.

- **Ventajas**
  - Los casos a estudiar pueden ser generados rápidamente, sin costes apreciables y producen información completa y detalla de las variables de interés
  - Permite el estudio sistemático en análisis paramétricos de la influencia de las variables de interés y de dar respuesta a los “y si...”.
  - Capacidad de simular casos reales en vez de modelos a escala.
  - Puede simular condiciones ideales imposibles de realizar en la práctica y así estudiar sólo el efecto de ciertos parámetros relevantes.
  - Permite explorar situaciones y eventos irrealizables en la práctica como explosiones o fallos en centrales nucleares.
- **Inconvenientes**
  - Existe un grado de incertidumbre inherente a todos los casos y es necesario aprender a gestionar y controlarlo para valorar correctamente los resultados.
  - Las soluciones exactas incorporan aproximaciones. Una solución aproximada de un problema físico real suele ser más precisa que la solución exacta de un modelo matemático poco elaborado.
  - Físicas no bien explicadas o falta de información en las propiedades del flujo y sus contornos pueden inducir errores que repercuten negativamente a la calidad de las soluciones. Entre ellos, errores de:
    - Discretización.
    - Datos de entrada.
    - Condiciones internas y de Contorno.
    - Modelización.

### 4.4.1. Esquema para el análisis con CFD

Las diferentes etapas del análisis de un caso con CFD incluyen:

- Definición del problema

Selección del modelo matemático e introducción a la geometría

- Discretización

Conversión de la geometría(continua) en un numero finito de puntos denominado malla o grid. Es importante adecuar el resultado a la fenomenología del problema y a los resultados a obtener.

- Análisis

Disponemos ahora de un conjunto de relaciones algebraicas entre los puntos de malla vecinos (esquema numérico). Esta relación proporciona una herramienta para la resolución posterior de las ecuaciones implicadas.



- Resolución

Obtención de los valores de las variables de flujo en los puntos de malla. Dependiendo del tipo de problema de tendrán ecuaciones diferenciales ordinarias o sistemas algebraicos. En ambos casos al final será necesario resolver sistemas de ecuaciones algebraicas de un tamaño considerable.

- Valoración resultados

La información obtenida puede ser enorme. Es muy importante la experiencia del usuario

#### 4.4.2. Aspectos relevantes para el mallado

Una vez definida la geometría necesitaremos crear un modelo en el cuál poder resolver las ecuaciones con derivadas parciales por iteración. El Método de Volúmenes Finitos(FVM) asume que el volumen de control está concentrado en el centro geométrico del elemento. Eso permite más libertad en el ratio de aspecto de sus elementos, y por ello es el más utilizado por los paquetes de CFD que trabajan con fluidos (Como p.e Ansys Fluent®).

- Distribución de elementos

La calidad del mallado juega un papel importante en la estabilidad y fiabilidad de la solución numérica. Al discretizar espacios continuos es esencial asegurar una densidad de malla suficiente para capturar los fenómenos producidos. En la mayoría de los casos, una pobre resolución en zonas críticas afectara gravemente a la solución obtenida. Por ejemplo, cuando se produce la separación de la capa límite debido a un gradiente de presiones adverso, la posición del punto de separación variara considerablemente si el mallado es insuficiente.

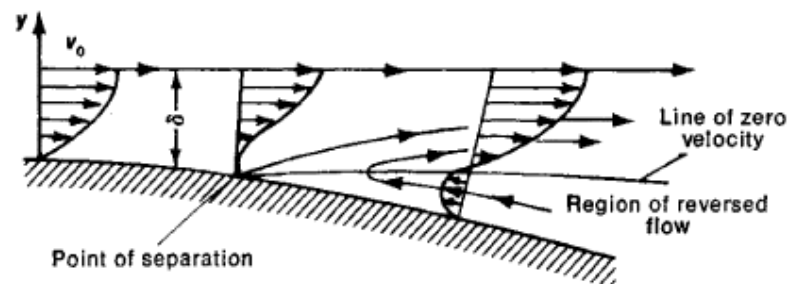


Figura 4.4.2-1 Desprendimiento de la capa límite  
(<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Separation+of+Flow>)

Se requiere una buena definición también para flujos turbulentos. Debido a la elevada interacción entre el valor medio y la turbulencia, los resultados son mucho más dependientes que los obtenidos en flujo laminar. Existen tratamientos cerca de las paredes para capturar correctamente el perfil de velocidades de la capa límite, cosa que también condicionara la resolución de la malla en las zonas cerca de las paredes.

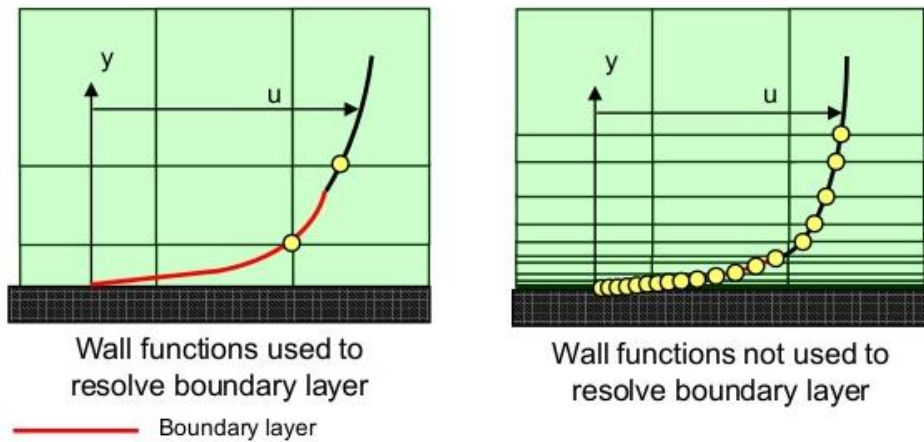


Figura 4.4.2-2 Wall functions en Ansys Fluent

En general, ningún flujo debe representarse por menos de 5 celdas. La mayoría de casos requerirán muchas más para resolverlo adecuadamente. En zonas con altos gradientes, la malla debe ser suficientemente densa como para minimizar los cambios en las variables de los fluidos de celda a celda. Desafortunadamente, esto es complicado de prever con antelación. Es necesario hacer hincapié en que el proceso de cálculo en escenarios complicados se verá limitado por los recursos computacionales (CPU, Memoria,...etc). Por lo tanto, aumentar la resolución de la malla implicará mayor coste computacional.

- Independencia de Malla

Si el mallado es pobre nos encontraremos con resultados poco fieles a los reales. A medida que refinamos la malla obtendremos resultados más precisos. Como mallas más finas, requieren un mayor coste computacional, podemos encontrarnos con una malla innecesariamente compleja. En este último caso, los resultados no serán más precisos, es decir, tendremos un exceso de operaciones que no supondrán una gran diferencia en los resultados obtenidos. Por ello, es necesario realizar un estudio de independencia de malla. Éste consiste en simular diferentes mallados, con las mismas condiciones de contorno y propiedades, variando únicamente parámetros de malla (p.e número de celdas, tamaño máximo de celda, tamaño máximo de cara, inflación...) para compararlos. En el momento que podamos asegurar que los resultados son suficientemente semejantes, podremos asegurar la independencia de nuestra malla.

### 4.4.3. Ecuaciones Fundamentales CFD

A continuación, se resumen las ecuaciones que utilizaremos para caracterizar nuestro caso, incluyendo las utilizadas por el software ANSYS Fluent. A grandes rasgos, veremos las ecuaciones ejecutadas en la simulación por el código implementado en el programa. Esta información se ha extraído de la Guía Teórica de Fluent().

#### 4.4.3.1. Numero de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que nos permite caracterizar nuestro flujo. Podremos diferenciar a partir de él si es laminar o turbulento (agua en tuberías circulares), según:

- $Re \leq 2300$  , flujo laminar.
- $2300 < Re$  , flujo turbulento.

Y podemos calcularlo a partir de:

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot c \cdot D}{\mu}$$

*Ecuación 4.4.3-1 Número de Reynolds Flujo interior tubo*

Donde:

$\rho$  : densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).

$c$  : velocidad fluido ( $\text{m/s}$ ).

$D$  : diámetro Tubo ( $\text{m}$ ).

$\mu$  : viscosidad dinámica ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ).

#### 4.4.3.2. Parámetro $Y^+$

Definido como la distancia adimensional de la celda a la pared, nos da información sobre como de grande debe ser nuestra capa límite. Permite determinar la altura a definir en la primera celda adyacente a la pared. El resto de capas se crearán como propagación de la primera. Según las características del flujo y la geometría, supondremos un  $Y^+$  que nos defina la altura de la primera capa límite necesaria.

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho U_\tau}{\mu}$$

*Ecuación 4.4.3-2 Ecuación  $Y^+$*

Donde:

$U_\tau$  : velocidad de fricción

$\Delta y$  : Altura primera celda

A partir de las propiedades del agua podemos calcular:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = U_e \sqrt{\frac{C_f}{2}}$$

*Ecuación 4.4.3-3 Velocidad de Fricción*

Donde:

$\tau_w$  : tensión cortante

$C_f$  : coeficiente de fricción

Podemos aproximar el coeficiente de fricción para tubos de forma empírica a través del número de Reynolds:

$$\frac{\overline{C_f}}{2} \approx \frac{0,039}{Re_{D_h}^{1/4}}$$

*Ecuación 4.4.3-4 Coeficiente de fricción tuberías circulares*

#### 4.4.3.3. Numero de Prandtl

El número de Prandtl se define como el cociente entre la viscosidad y la difusividad térmica. Da una idea sobre la relación entre las velocidades de convección y la conducción de calor.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

*Ecuación 4.4.3-5 Número de Prandtl*

Donde:

$\nu$  : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

$\alpha$ : difusión térmica (m<sup>2</sup>/s).

$\mu$  : viscosidad dinámica (N·s/m<sup>2</sup>).

$C_p$ : Calor específico (J/Kg·K).

$k$ : conductividad térmica (W/mK)

#### 4.4.3.4. Número de Grashoff

El número de Grashoff se define como el cociente entre las fuerzas de flotabilidad y las fuerzas viscosas.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

*Ecuación 4.4.3-6 Número de Grashoff*

Donde:

$g$  : gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$\beta$ : Coeficiente expansión volumétrica (°K<sup>-1</sup>).

$T_s$  : Temperatura superficie (°K).

$T_\infty$  : Temperatura ambiente (°K).

$L$  : Longitud característica (m).

$\nu$  : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

#### 4.4.3.5. Número de Raileigh

El número de Rayleigh nos permite caracterizar los flujos por flotación según si son por convección natural o forzada.

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr$$

*Ecuación 4.4.3-7 Número de Raileigh*

- Convección forzada  $Ra_L > Ra_c \approx 10^9$
- Convección natural  $Ra_L < 10^6$

#### 4.4.3.6. Energía

Es la ecuación principal que permite cuantificar todos los mecanismos tanto de transferencia de calor como

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h$$

*Ecuación 4.4.3-8 Ecuación de energía*

Donde por términos:

1. Variación energía respecto al tiempo.
2. Variación energía según entradas-salidas de masa.
3. Conducción.
4. Difusión.
5. Disipación viscosa.
6. Generación interna de calor (p.e por efecto joule)

#### 4.4.3.7. Ecuaciones de Navier – Stokes

Son un sistema de ecuaciones con derivadas parciales no lineales que describen el movimiento(t,x,y,z) de un fluido newtoniano. Se obtienen aplicando principios de conservación mecánicos y termodinámicos. Su forma más útil es la formulación diferencial que se obtiene tomando diversas consideraciones. La consideración principal es suponer que las fuerzas tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidades (ley de viscosidad de Newton). Su forma diferencial

- Conservación de Masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m$$

*Ecuación 4.4.3-9 Conservación de masa*

Donde  $\rho$  es la densidad y  $S_m$  fuente de masa añadida a la fase continua proveniente de una segunda fase dispersa (p.e. masa añadida al aire por evaporación de gotas líquidas) o una función del usuario.

- Conservación de Momento (compacta)

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

*Ecuación 4.4.3-10 Conservación de momento*

Donde los dos últimos términos corresponden a la fuerza gravitatoria y fuerzas externas respectivamente. Y el tensor de viscosidad  $\bar{\tau}$  :

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$$

*Ecuación 4.4.3-11 Tensor de velocidad*

Donde  $\mu$  es la viscosidad molecular,  $I$  la matriz identidad y el segundo término en la parte derecha los efectos de dilatación.

#### 4.4.3.8. Modelo de Turbulencia

Existen diferentes modelos para simular flujos turbulentos. En concreto, nosotros trabajaremos con el modelo Estándar k-ε. Es modelo utilizado para el cálculo industrial debido a su robustez, economía y precisión de resultados en caso de flujos con transferencia de calor. Se basa en la resolución de dos ecuaciones de transporte k (energía cinética) y ε (Ratio disipación). No tiene en cuenta la viscosidad molecular, por lo tanto, únicamente es válida para flujos completamente turbulentos.

#### 4.4.3.9. Modelo de viscosidad

En el modelo Estándar k-ε, se modela con la siguiente ecuación:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

*Ecuación 4.4.3-12 Viscosidad modelo Estándar k-ε*

Donde k,ε son los coeficientes del modelo y  $C_\mu$  es una constante.

## 5. Estudio previo

### 5.1 Análisis preliminar

Para poder llevar a cabo una selección acorde con nuestras necesidades, llevaremos a cabo un estudio de las soluciones que se han encontrado hasta ahora y seleccionaremos el sistema más conveniente. Deberemos tener en cuenta las condiciones y requerimientos que debe con la fachada:

- La función principal del sistema debe ser captar radiación solar, con la condición que no debe impedir o perjudicar gravemente la luminosidad del interior de la estancia.
- El calor debe poder ser extraído mediante un fluido para ser posteriormente tratado. Ya sea para calefacción, ACS o para ser eliminado (p.e torre de refrigeración).
- Un aspecto importante a tener en cuenta es que muchos diseños son cuestionados por romper con la estética del edificio.
- Sus dimensiones y posición están limitadas al interior de la fachada. Sitiada con orientación sur con clima Mediterráneo (Barcelona). Las dimensiones del espacio interior del doble acristalamiento son de 4x4x0,2 m. La cara que da al exterior es de un solo cristal y la que da al interior del edificio es doble. El grosor de los cristales es de 6 mm.

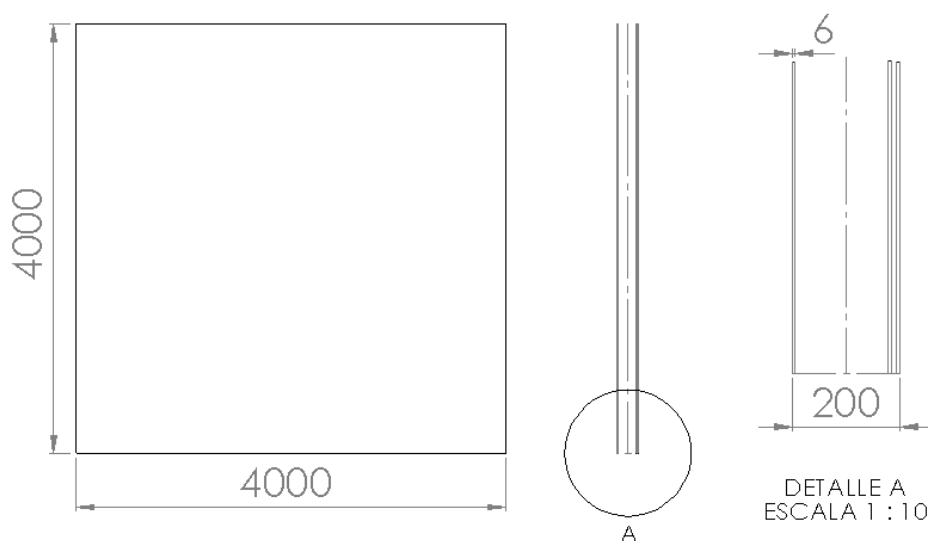


Figura 4.4.3-1 Geometría Fachada (Solidworks)

## 5.2 Diseño propuesto

Después del análisis de las soluciones encontradas hasta la actualidad (6,11), nos decantamos por estudiar un sistema de captación solar mediante tubos de vacío con una superficie reflectora concentradora colocada en la parte posterior (10).



*Figura 4.4.3-1 Fachada Colectores parabólicos compuestos (10)*

En primer lugar, se ha seleccionado un sistema de tubos de vacío tanto por su eficiencia como a la disposición de la fachada. La zona de vacío reduce las pérdidas por convección y conducción con el exterior y mediante los reflectores, aumenta la radiación total. Ésta superficie tiene orificios, dejando pasar parte de la radiación al interior de la habitación y reduciendo el impacto visual de los mismos, permitiendo tener luz natural.

Cada tubo está formado por dos tubos de vidrio de boro-silicato entre los cuales se genera el vacío. La cara externa del tubo interior está tratada térmicamente para absorber el máximo de radiación posible. Normalmente el tubo interior contiene una placa metálica de cobre donde se coloca un tubo por el cuál circula el fluido calor portador. Existen diferentes métodos para extraer el calor absorbido, comentados anteriormente. En nuestro caso, utilizaremos flujo de agua directo como desarrollaremos posteriormente.



### 5.3 Simplificaciones adoptadas

Debido al tamaño del sistema, el coste computacional de la simulación y la complejidad del mallado son demasiado elevados. Únicamente modelaremos un subconjunto (módulo) del sistema compuesto por un tubo de vacío, reflector y envuelto por una sección de la fachada. De este modo, tanto los tiempos de preparación de malla y condiciones de contorno junto con los costes computacionales se verán reducidos drásticamente.

El módulo, se dividirá en tres zonas principales para su estudio por separado.

No se tendrán en cuenta detalles constructivos que entorpezcan o compliquen innecesariamente el modelo geométrico. Estos detalles no son necesarios ya que el objetivo principal es valorar los efectos de los fenómenos térmicos participantes. Tomaremos las siguientes consideraciones:

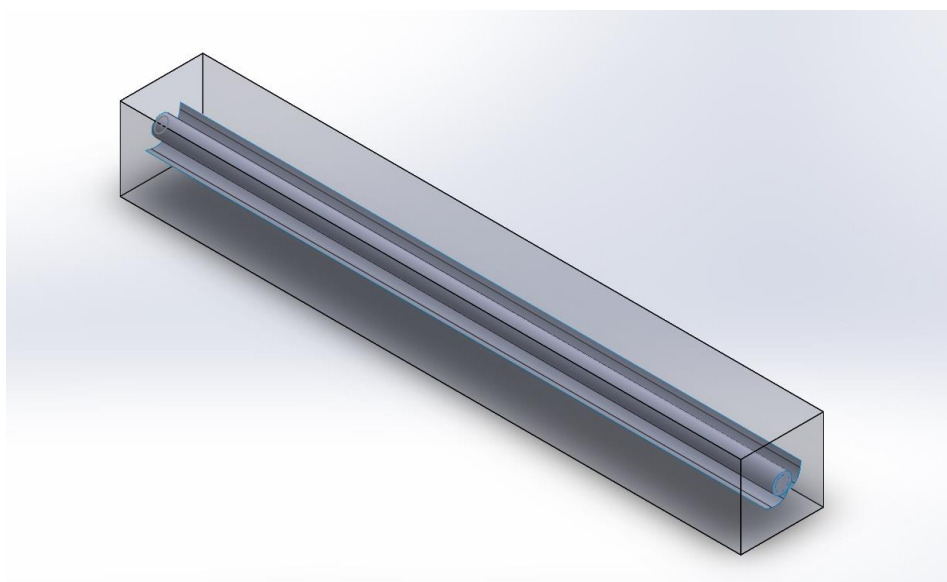
- Los diferentes volúmenes del módulo se dividirán mediante superficies.
- El tubo está abierto por ambos lados.
- Tanto el tubo como el reflector “flotarán” dentro del volumen de la cavidad interior de la fachada.
- Diferentes superficies de contorno configuraran entradas y salidas de flujos de calor y de masa.
- Tanto el tamaño de la cavidad interior como el ángulo del reflector estarán parametrizados en el modelo para el mallado.

## 5.4 Presentación de la Geometría

Para la definición de las geometrías, se ha utilizado SOLIDWORKS, software CAD (diseño asistido por computación). Presentaremos inicialmente el diseño completo integrado en una posible configuración de fachada y posteriormente el subconjunto que estudiaremos en este trabajo. En el anexo se pueden encontrar tanto los planos como el detalle de la geometría. La definición de la geometría del reflector se detalla en el anexo.



*Figura 4.4.3-1 Geometría de una posible fachada completa (Solidworks)*



*Figura 4.4.3-2 Geometría modulo fachada (Solidworks)*

## 5.5 Parámetros constructivos

**Tabla 4.4.3-1 Parámetros constructivos cristales (12)**

Parámetro	Interior	Exterior
Altura(mm)	200	
Ancho(mm)	1503	
Espesor(mm)	0	
Tipo Superficie	Semi-transparente	
Transmisividad	0,35	0,78
Absortividad	0,15	0,15
Reflectividad	0,5	0,07
Emisividad Externa*	0,89	0,89
Emisividad Interna*	0,05	0,11

**Tabla 4.4.3-2 Parámetros ópticos reflector**

Parámetro	Valor
Espesor(mm)	0
Tipo Superficie	Semi-transparente
Transmisividad	0,3
Absortividad	0,2

NOTA: Los parámetros ópticos se han supuesto convenientemente según su función. La definición de la geometría del reflector está en el anexo.

**Tabla 4.4.3-3 Parámetros constructivos tubo de vacío**

Superficie	Exterior	Interior
Diámetro(mm)	47	33
Longitud(mm)	1503	1503
Presión de vacío(Pa)	$5 \cdot 10^{-3}$	
Tipo Superficie	Semi-transparente	Opaca
Transmisividad	0,76	0
Absortividad	0,17	0,94
Reflectividad	0,07	0,06
Emisividad Interna*	0,85	0,06
Emisividad Externa*	0,15	

NOTA: Los valores constructivos para la simulación del tubo de vacío se han obtenido de una empresa comercializadora de un tipo de tubo similar (13). Aunque el funcionamiento no es exactamente el mismo, consideraremos los valores aceptables para la simulación.

\*Las emisividades interna o externa refieren respectivamente al interior y exterior del volumen modelado.

## 6. Estudio de independencia de malla

Para facilitar el estudio, dividiremos la geometría en tres zonas. De este modo podremos evaluar por separado el comportamiento y densidad de malla necesarios según la naturaleza del fenómeno térmico. Una vez definidas todas las mallas en cada zona, podremos evaluar el conjunto completo.

Diferenciaremos 3 zonas:

1. Tubo interior (Volumen azul): Tubo por dónde circulará agua.
2. Tubo vacío (Volumen amarillo): Cavity entre tubo con condiciones de vacío.
3. Interior de la fachada (Volumen Verde): Cavity interna de la fachada. Incluye la superficie del colector.

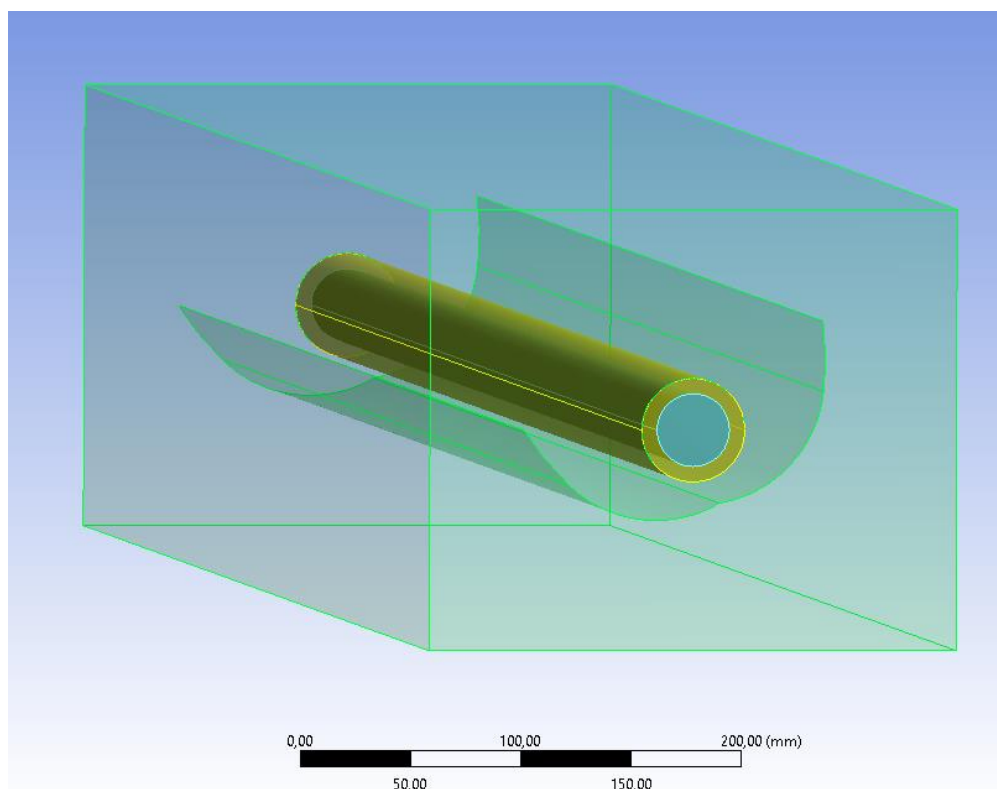


Figura 4.4.3-1 División Geometría Modelo (Fuente: Ansys Fluent)

## 6.1 Tubo interior

El tubo interior corresponde a la zona por donde circulará el fluido calor-portador, en nuestro caso agua. La superficie externa de este tubo está tratada para absorber el máximo de radiación, calentando el fluido interno mediante convección. La tabla muestra un resumen de sus dimensiones y propiedades:

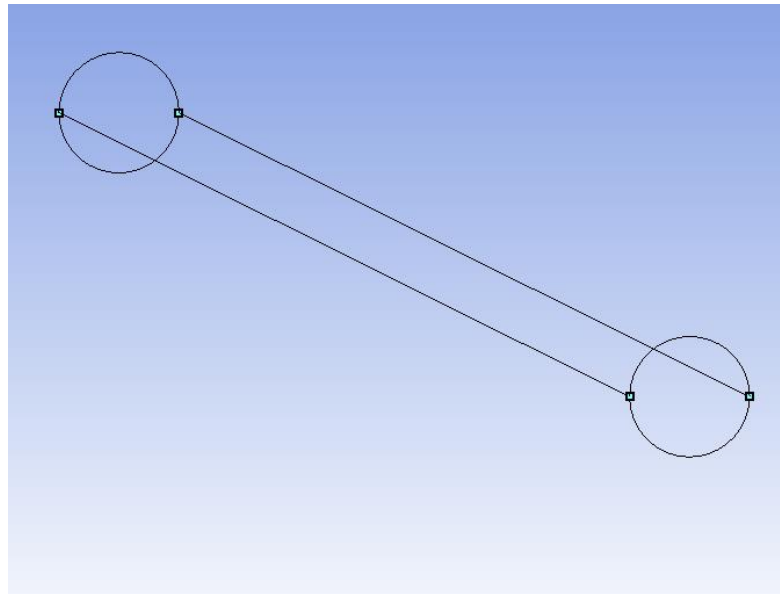


Figura 4.4.3-1 Wireframe tubo interior (Ansys Meshing)

**Tabla 4.4.3-1 dimensiones tubo interior**

	Valor	Unidades
<b>Diámetro</b>	33	mm
<b>Longitud</b>	1503	mm

### 6.1.1. Cálculos previos

- Régimen de flujo

Necesitamos determinar el fluido que queremos simular. Sabemos que la velocidad del fluido para este tipo de colectores esta entre 1 y 3m/s. Suponiendo una velocidad de 2 m/s, con el diámetro del tubo y las propiedades del agua a 25 °C, utilizando la ecuación 4.4.3-1 sabremos si nos encontraremos con un perfil laminar o turbulento:

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot c \cdot D}{\mu} = \frac{998 \frac{Kg}{m^3} \cdot 2 \frac{m}{s} \cdot 0,033 m}{10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}} = 65868$$

**Tabla 6.1.1-1 Resumen datos agua tubo interior**

Parámetro	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c$ (m/s)	D (m)	$\mu \cdot 10^3$ (N·s/m <sup>2</sup> )	Re
Valor	998,0	2,0	0,033	1	65868

Por lo tanto, como  $Re \gg 2300$  nos encontramos con un perfil turbulento.

- Y+

A partir de las ecuaciones descritas en el apartado 4.4.3.2, y suponiendo un  $Y+ = 1$  (capa viscosa), obtenemos la altura de la primera capa para el caso base.

$$\frac{\overline{C_f}}{2} \approx \frac{0,039}{Re_{Dh}^{\frac{1}{4}}} = \frac{0,039}{65868^{\frac{1}{4}}} = 2,43 \cdot 10^{-3} \rightarrow U_\tau = U_e \sqrt{\frac{\overline{C_f}}{2}} = 2 \frac{m}{s} \cdot \sqrt{2,43 \cdot 10^{-3}} = 0,0987 \frac{m}{s}$$

$$\Delta y = \frac{y^+ \mu}{\rho U_\tau} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}}{998 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0,0987 \frac{m}{s}} = 1,015 \cdot 10^{-5} m$$

**Tabla 6.1.1-2 Cálculo inflation tubo interior**

Parámetro	$y^+$	$\Delta y_1$ (mm)
Valor	1	$1,015 \cdot 10^{-2}$

## 6.1.2. Proceso de mallado

Como la geometría no es compleja, convendría utilizar un método de hexaedros. Éste método es conveniente tanto para asegurar el correcto desarrollo del perfil de velocidades como la convección (Capa límite). Debido forma circular del perfil, se genera una configuración irregular de los elementos en más alejados, por lo tanto, para el centro del cilindro utilizaremos prismas con base triangular. Estos elementos permiten mayor libertad al mallar generando una transición suave entre los dos tipos de elementos. Para mejorar la regularidad, forzaremos la división de la cara en formas regulares (Face Meshing). Para controlar el tamaño de las celdas, y por lo tanto el número de elementos, incluiremos un Sizing (división de aristas), tanto longitudinalmente como radial al tubo.

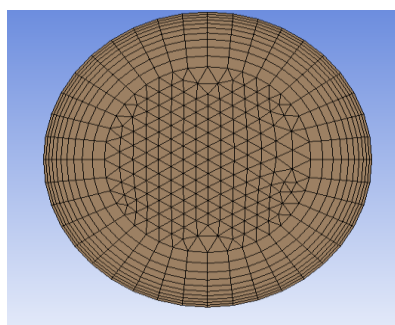


Figura 6.1.2-4 Mallado superficie entrada

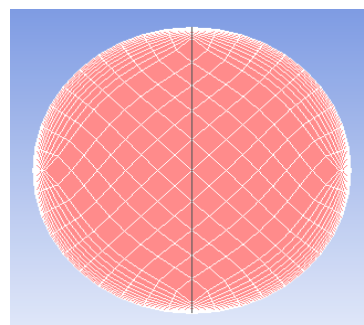


Figura 6.1.2-4 Fallo inflation

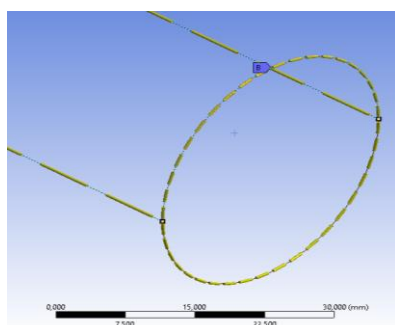


Figura 6.1.2-4 Sizing circunferencial

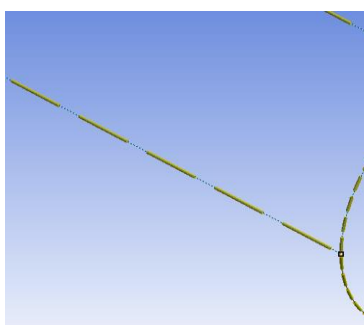


Figura 6.1.2-4 Sizing longitudinal

**Tabla 6.1.2-1 Mallado tubo interior**

Operación	Objetivo	Tipo	Valor	Unidades
Edge Sizing	Aristas longitudinales	Tamaño elemento	10	mm
Edge Sizing	Aristas circulares	Numero de divisiones	40	#
Inflation	Pared	Altura primera capa	1,015·10 <sup>-2</sup>	mm
		Numero de capas	15	#
		Factor crecimiento	1,2	-
Estadísticas	Nodos		134160	
	Elementos		156978	

### 6.1.3. Simulación

El primer paso de la simulación es saber que ecuaciones y modelos que van a intervenir. Como hemos desarrollado en el apartado 7.4, nos interesa estudiar el fenómeno convectivo dentro del tubo. Necesitaremos entonces activar la ecuación de Energía. Sabemos también que tendremos un perfil turbulento, así que necesitaremos un modelo de viscosidad que trate este fenómeno. Utilizaremos inicialmente un tratamiento en las paredes que nos permita resolver la capa viscosa y así poder capturar con mayor resolución las influencias de la turbulencia en la convección.

**Tabla 6.1.3-1 Modelos tubo interior**

Ecuación de Energía	Activada	
	k-epsilon	
Modelo viscosidad	Tipo	Standard
	Tratamiento paredes	Enhanced Wall Treatment

- Propiedades del fluido

El fluido que circulará por el interior del tubo será agua. Supondremos que la temperatura de entrada será de 25 °C. Las propiedades del mismo no variarán con la temperatura y aprovecharemos la biblioteca de Ansys Fluent para determinar sus valores.

**Tabla 6.1.3-2 Propiedades agua tubo interior**

Densidad	Constantes (Biblioteca Ansys Fluent)
Calor específico	
Conductividad Térmica	
Viscosidad	
Temperatura	25°C

- Condiciones de contorno

El último paso es establecer las condiciones de contorno. Queremos simular un flujo turbulento afectado por convección con la pared. Necesitaremos definir: una entrada de fluido, salida de fluido y una pared que aporte energía térmica simulando el calor entrante por radiación. Para añadir este efecto, impondremos una temperatura constante en toda la pared. De este modo, conseguiremos un gradiente de temperaturas que calentara el agua progresivamente a lo largo del tubo.

**Tabla 6.1.3-3 Condiciones de contorno tubo interior**

Tipo			Tratamiento	
Pared	Wall	Temperatura constante	Temperatura(°C)	60
			Espesor(mm)	0
Entrada	Velocity-inlet	Momentum	Velocidad(m/s)	2
			Turbulencia(%)	5
			Diámetro hidráulico(mm)	33
		Térmico	Temperatura(°C)	25
Salida	Pressure-outlet	Momentum	Presión(Pa)	0
		Térmico	Temperatura Backflow(°C)	25
		Turbulencia	Turbulencia(%)	5
			Diámetro hidráulico(mm)	33



- Residuales

Una vez definidas las condiciones de contorno, resta definir cuándo debe parar la simulación. Para ello, utilizaremos un monitor que evalúe el valor de la temperatura media en la salida. Junto con los residuales de convergencia de continuidad, energía y del modelo viscoso, esta temperatura media nos indicará si la solución se ha estabilizado o son necesarias más iteraciones. Dichos residuales deberán ser menores a  $10e-5$ . Por lo tanto, no solo será necesario que los residuales converjan, sino que también la temperatura (parámetro de salida) debe ser constante.

**Tabla 6.1.3-4 Residuales tubo interior**

Residual	Convergencia
Continuidad	$10e-5$
Velocidad - X	$10e-5$
Velocidad - Y	$10e-5$
Velocidad - Z	$10e-5$
Energía	$10e-6$
k	$10e-5$
epsilon	$10e-5$
Temp. Media Salida	Constante

### 6.1.4. Casos de prueba

Por último, comprobaremos que nuestra solución es necesaria y suficiente. Para ello, ejecutaremos la misma simulación variando únicamente parámetros del mallado. Como nuestro caso incluye inflación, evaluaremos cómo se comporta la solución en función de esta y posteriormente trataremos el resto de tamaños de malla. Obtendremos la solución definiendo un diámetro en la salida del tubo, del cual obtendremos los perfiles tanto de velocidad como de temperatura.

- Capa Límite

Comprobaremos, el grado de definición necesario alrededor de las paredes. Según el tratamiento utilizado en las paredes

**Tabla 6.1.4-1 Casos sizing tubo interior**

Prueba	Y+	Altura primera capa(mm)	Numero de capas	Factor crecimiento
Inicial	1	0,0101	15	1,2
Segunda	50	0,507	8	1,2

- Tamaño de celdas
  - Dependencia parámetro circunferencial

Dividiremos inicialmente las circunferencias en 40 segmentos idénticos. Compararemos, igual que en el caso anterior, las diferencias con diferentes números de divisiones para encontrar el óptimo:

**Tabla 6.1.4-2 Casos parámetro circunferencial tubo interior**

Prueba	Numero de Divisiones	Elementos
Inicial	40	156978
Segunda	20	38988

- Dependencia parámetro longitudinal

Inicialmente, hemos supuesto que el tamaño ideal de la profundidad de las celdas, aristas con dirección del fluido o longitudinales, es de 10 mm. Necesitaremos comprobar cómo depende la solución obtenida respecto este tamaño.

**Tabla 6.1.4-3 Casos parámetro longitudinal tubo interior**

Prueba	Tamaño de Elementos	Elementos
Inicial	10	38988
Segunda	20	17328

## 6.1.5. Resultados

- Tratamiento de las paredes (Inflation)

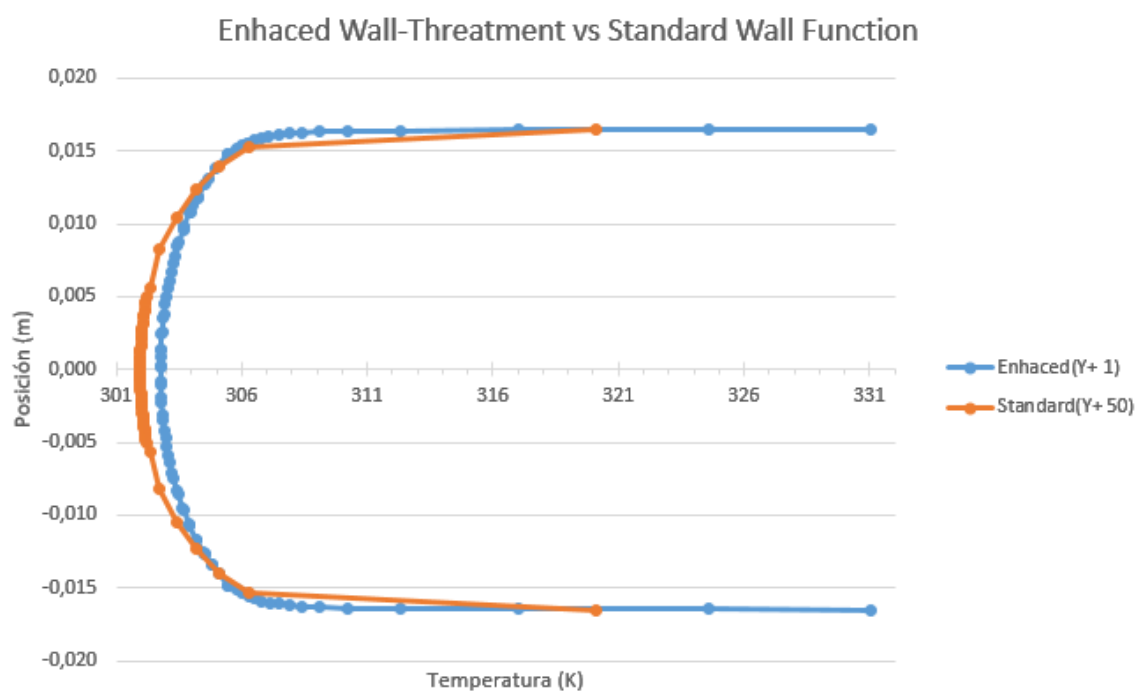
Comparando los resultados obtenidos vemos que podemos permitirnos utilizar el Standard Wall Function. Esto implica que no es necesaria la resolución de la capa viscosa y, por lo tanto, podemos reducir el número de elementos cerca de las paredes(Inflation). Además, el Standard Wall Function es un tipo de tratamiento que aproxima el cálculo del perfil con una correlación logarítmica, reduciendo notablemente el coste computacional.

**Tabla 6.1.5-1 Resultados inflation tubo interior**

Caso	Tratamiento paredes	Resuelve capa viscosa?	Y+	Elementos	Temp. Media Salida (°K)
Inicial	Enhaced Wall-threatment	Si	1	156978	304,61
Segundo	Standard Wall Function	No	50	109098	304,13

**Tabla 6.1.5-2 Diferencia resultados entre modelos**

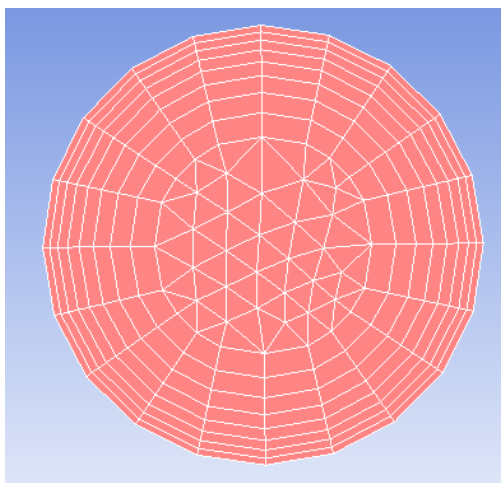
Valor Real	Aproximación	Error Absoluto	Error Relativo
304,61	304,13	0,48	0,15%



*Figura 6.1.5-1Gráfico comparación de métodos (Inflation)*

- Tamaños de celda (Sizing)
  - Circunferencial

Comprobamos que, al reducir el número de divisiones, el tiempo de cálculo se ve claramente reducido ya que tenemos muchos menos elementos. Todo y así, el valor obtenido a la salida es prácticamente idéntico. Optamos por no reducir más el número de divisiones puesto que el ratio de aspecto de la malla sería demasiado “burdo” y el mallado sería muy diferente a la geometría (circunferencias insuficientemente definidas).



*Figura 6.1.5-2 Aristas de las celdas en la superficie de salida (Ansys Meshing)*

**Tabla 6.1.5-3 Resultado sizing circunferencial tubo interior**

Caso	Divisiones	Elementos	Temp. Media Salida (°K)
<b>Inicial</b>	40	109098	304,13
<b>Segundo</b>	20	38988	304,19

- Longitudinal

Análogamente a lo comentado anteriormente, a priori se podría reducir todavía más el número de elementos, pero teniendo en cuenta las dimensiones de las celdas, consideramos conveniente no aumentar más su tamaño.

**Tabla 6.1.5-4 Resultados sizing longitudinal tubo interior**

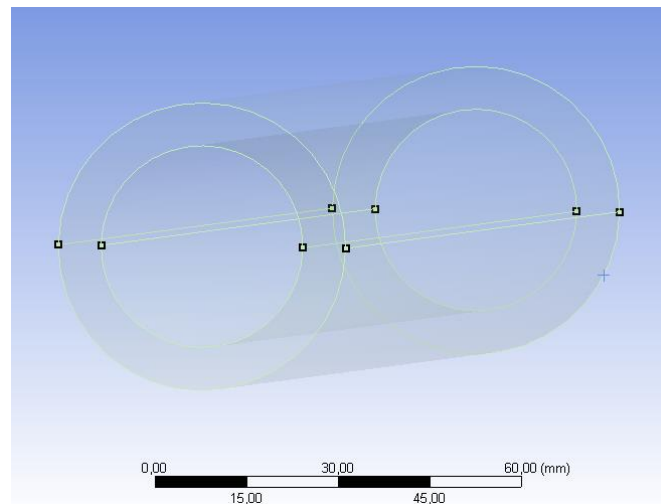
Caso	Tamaño Divisiones (mm)	Elementos	Temp. Media Salida (°K)
<b>Inicial</b>	10	38988	304,19
<b>Segundo</b>	20	17328	304,19

## 6.2 Tubo de vacío

El tubo vacío corresponde a la zona entre tubos. A través de él pasara la radiación solar desde el interior de la fachada hacia el tubo interior. La tabla muestra un resumen de sus dimensiones y propiedades:

**Tabla 6.1.5-1 Dimensiones tubo de vacío**

Arista	Valor	Unidades
<b>Diámetro interior</b>	33	mm
<b>Diámetro exterior</b>	47	mm
<b>Longitud</b>	1503	mm



*Figura 6.1.5-1 Wireframe Zona vacío (Ansys Meshing)*

### 6.2.1. Proceso de mallado

Como la geometría no es compleja utilizaremos un método de hexaedros. A diferencia del caso anterior, el interior es hueco, por tanto, podemos utilizar únicamente hexaedros. Añadiremos capas de celdas cerca de las paredes (Inflation) para capturar correctamente la radiación. Aprovechando las aristas del modelo incluiremos un control de tamaño de celda (Sizing), tanto longitudinalmente como radial.

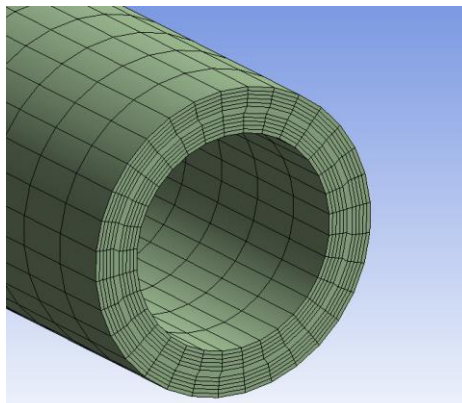


Figura 6.2.1-3 Inflation tubo de vacío (Ansys Meshing)

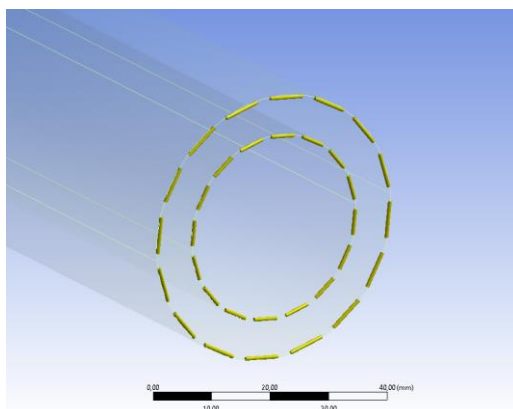


Figura 6.2.1-1 Sizing circunferencias tubo de vacío (Ansys Meshing)

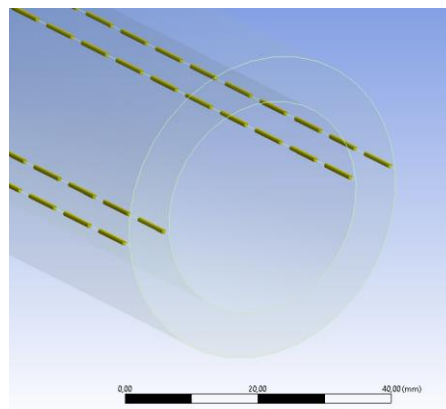


Figura 6.2.1-2 Sizing longitudinal tubo de vacío (Ansys Meshing)

**Tabla 6.2.1-1 Mallado tubo de vacío**

Operación	Objetivo	Tipo	Valor	Unidades
Edge Sizing	Longitud cilindro	Tamaño elemento	10	mm
Edge Sizing	4 circunferencias cilindro	Numero de divisiones (por circunferencia)	16	#
Method: MultiZone	Volumen	Hexaedros		
Inflation	Pared interna y externa	Altura primera capa	0,6	mm
		Numero de capas	5	#
		Factor crecimiento	1	
Estadísticas	Nodos		58368	#
	Elementos		53152	#

## 6.2.2. Cálculos previos

Como paso previo a la simulación, necesitamos definir los parámetros convectivos del modelo en sus contornos. Tenemos la convección generada en la pared interna (circulación de agua por el tubo interior) y en la pared externa (atmosfera de nitrógeno estanca). Los laterales del tubo no se tendrán en cuenta en este caso.

Para el cálculo de los valores de los coeficientes convección nos basaremos en dos premisas:

- Primero, debido a las bajas velocidades en el exterior (nitrógeno estanco) consideraremos un valor bajo de convección, 5 W/m<sup>2</sup>K serán suficientes según la experiencia de nuestro tutor.
- Segundo, para la convección en el interior (circulación de agua) calcularemos éste valor igualando el calor absorbido por el fluido con el generado por la convección:

**Tabla 6.2.2-1 Datos flujo de agua**

Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
densidad	998	Kg/m <sup>3</sup>	Te Agua	25	°C
Cp agua	4186	J/Kg°C	Ts agua	32	
Velocidad fluido	2	m/s	Tf lejos pared	25	
Radio tubo	0,0165	m	Tw	60	
Longitud tubo	1,5				

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_w &= \dot{Q}_c \\ \dot{Q}_c &= h A (T_s - T_f) \\ \dot{Q}_w &= c_p \dot{m} (T_s - T_e) \end{aligned} \right\} \rightarrow h = \frac{c_p \dot{m} (T_s - T_e)}{A (T_s - T_f)} = \frac{c_p \rho c r (T_s - T_e)}{L (T_s - T_f)} =$$

$$= \frac{4186 \frac{J}{Kg^\circ C} 998 \frac{Kg}{m^3} 2 \frac{m}{s} 0,0165m (32^\circ C - 25^\circ C)}{1,5 m (60^\circ C - 25^\circ C)} = 18382 \frac{W}{m^2 K}$$

Donde:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho c (\pi r^2) \quad ; \quad A_{pared} = 2\pi r L$$

**Tabla 6.2.2-2 Valores convección tubo de vacío**

Coeficiente de convección	Valor (W/m <sup>2</sup> K)
Interior	5
Exterior	18382

### 6.2.3. Simulación

El primer paso de la simulación es definir que ecuaciones y modelos van a intervenir. Nos interesa estudiar cómo se propaga la radiación a través del cilindro. Por lo tanto, será necesario activar: ecuación de energía, flujo laminar y modelo de carga solar P1.

**Tabla 6.2.3-1 Modelos tubo de vacío**

<b>Ecuación energía</b>	Activada	
<b>Modelo viscosidad</b>	Laminar	
<b>Modelo Radiación</b>	P1	Rastreo rayos solares
	Carga Solar	Calculadora Solar

- Propiedades del fluido

En este caso tendremos el vacío en el interior por lo tanto deberemos definir la presión del aire en el interior. Ansys Fluent incorpora una biblioteca con materiales predefinidos. En nuestro caso tomaremos aire a 25°C con propiedades constantes y parchearemos (forzaremos posteriormente) las condiciones iniciales para definir la presión de vacío.

**Tabla 6.2.3-2 Propiedades vacío (aire)**

<b>Densidad</b>	Constantes (Biblioteca Ansys Fluent)
<b>Calor específico</b>	
<b>Conductividad Térmica</b>	
<b>Viscosidad</b>	
<b>Temperatura</b>	25°C
<b>Presión</b>	$5 \cdot 10^{-3}$ Pa

- Calculadora solar

Como podemos ver el modelo de radiación incluye una calculadora solar que nos va a permitir definir las diferentes condiciones del mismo. La localización será Barcelona, escogeremos un día de verano con elevada radiación solar y orientaremos el sol respecto la malla con la superficie longitudinal hacia el sur y la lateral al este:

**Tabla 6.2.3-3 Calculador solar tubo de vacío**

<b>Obtenido de la Calculadora</b>	Vector dirección Solar		
	Radiación Directa		
	Radiación Difusa		
<b>Posición global</b>	Longitud	2.1769	grados
	Latitud	41.3825	grados
	Zona Horaria	UTC+02:00	+GMT
<b>Fecha</b>	Día	21	
	Mes	Junio	
	Hora	12:00	
<b>Orientación Malla</b>	Norte	(0,0,-1)	(x,y,z)
	Este	(1,0,0)	(x,y,z)
<b>Método Irradiación</b>	Máxima radiación teórica		



- Condiciones de contorno

Como el objetivo es comprobar la validez de la malla definiremos la carga solar incidente en el tubo y las propiedades ópticas de las paredes. Necesitamos definir también los coeficientes de difusión para las dos superficies determinados anteriormente.

**Tabla 6.2.3-4 Condiciones de contorno tubo de vacío**

Superficie contorno	Tipo	Condiciones térmicas	Parámetro	Valor	Unidades
Exterior	Wall	Mezcla: Radiación + Convección	Coef. Transferencia Externa	5	W/m <sup>2</sup> K
			Temperatura radiación exterior	25	°C
			Temperatura interna	25	°C
			Emisividad Interna	0,85	
			Emisividad Externa	0,15	
		Radiación	Tipo Superficie	Semi-transparente	
			Transmisividad	0,76	
			Absortividad	0,17	
			Participa radiación solar	Si	
Interior	Wall	Convección	Coef. Transferencia	18382	W/m <sup>2</sup> K
			Temperatura	25	°C
			Emisividad Interna	0,06	
		Radiación	Tipo Superficie	Opaca	
			Absortividad	0,94	
			Participa radiación solar	Si	
Laterales	Wall	Temperatura	Temperatura	25	°C
			Emisividad Interna	1	
			Participa radiación solar	No	

- Residuales

Utilizaremos un monitor que evalúe la temperatura media de las superficies internas y externas. Junto con los residuales de convergencia de continuidad, energía y del modelo viscoso, estas temperaturas medias nos indicarán si la solución se ha estabilizado o son necesarias más iteraciones. Por lo tanto, no solo será necesario que los residuales converjan, sino que también la temperatura en la salida (superficie interna) debe ser constante.

**Tabla 6.2.3-5 Residuales tubo de vacío**

Residual	Convergencia
Continuidad	10e-5
Velocidad - X	10e-5
Velocidad - Y	10e-5
Velocidad - Z	10e-5
Energía	10e-8
P1	10e-8
Temp. Media superficie interior	Constante

## 6.2.4. Casos de prueba

Finalmente, comprobaremos que nuestra solución es necesaria y suficiente. Para ello, ejecutaremos la misma simulación variando únicamente los parámetros del mallado. Como nuestro caso incluye inflación, primero evaluaremos cómo se comporta la solución en función de esta. Definiremos un diámetro donde obtendremos los valores calculados mediante Fluent.

- Inflation

Necesitamos asegurar una correcta definición del mallado cerca de las paredes. Para ello, nos basaremos en dos premisas. Primero, definiremos el número de capas a 5 y el factor de crecimiento de capa a 1. Según la experiencia de nuestro tutor son valores aceptables. Veremos si hay diferencias en los resultados variando la altura de la primera capa:

**Tabla 6.2.4-1 Casos Inflation tubo de vacío**

Caso	Altura primera capa (mm)	Numero de capas	Factor crecimiento
Inicial	0,6	5	1
Segundo	0,2	10	
Tercero	Sin inflation		

- Tamaño de celdas

Tal y como hemos definido nuestras operaciones de mallado, podemos controlar fácilmente el tamaño de las celdas mediante dos parámetros: la división de los diámetros y la división longitudinal. Compararemos como en el caso anterior ya comentado, en función de estos dos parámetros. Es importante tener en cuenta que a posteriori relacionaremos las celdas de la superficie interna con el tubo interior anteriormente definido. Es conveniente no tener una relación mayor de 10 a 1 entre el tamaño de las respectivas celdas en contacto para asegurar una buena transferencia entre superficies y no perder resolución del flujo de radiación.

- Dependencia parámetro circunferencial

Dividiremos inicialmente las circunferencias en 40 segmentos idénticos. Compararemos, igual que en el caso anterior, las diferencias con diferentes números de divisiones para encontrar el óptimo:

**Tabla 6.2.4-2 Casos parámetro circunferencial tubo de vacío**

Caso	Número de divisiones (por cada circunferencia)
Inicial	32
Segundo	20

- Dependencia parámetro longitudinal

Inicialmente, hemos supuesto que el tamaño ideal de la profundidad de las celdas, aristas con dirección del fluido o longitudinales, es de 10 mm. Necesitaremos comprobar cómo depende la solución obtenida respecto este tamaño.

**Tabla 6.2.4-3 Casos parámetro longitudinal tubo de vacío**

Caso	Valor	Unidades
Inicial	10	mm
Segunda	20	

## 6.2.5. Resultados

- Tratamiento en las paredes (Inflation)

La definición del mallado cerca de las paredes debe ser suficiente para capturar y transmitir correctamente la radiación incidente. A partir de la convergencia y valor de la temperatura media en la superficie externa (entrada) e interior(salida) validamos la suficiencia de malla en las paredes.

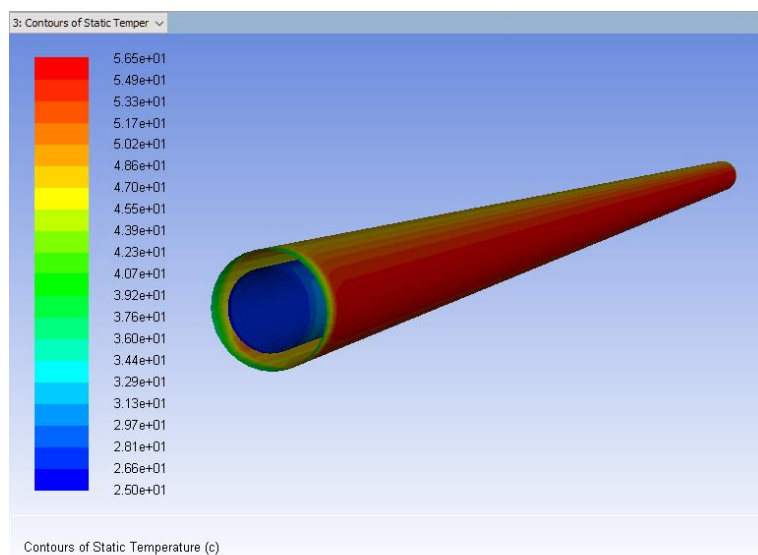


Figura 6.2.5-1 Temperaturas tubo de vacío (Ansys Fluent)

**Tabla 6.2.5-1 Resultados casos Inflation**

Caso	Altura primera capa (mm)	Capas	Elementos	Temp. media sup. Entrada (°K)	Temp. media sup. Salida (°K)
Inicial	0,6	5	53152	322,33	298,17
Segundo	0,2	10	101472	322,73	298,17
Tercero	No		9664	322,72	298,17

Como podemos ver la temperatura de salida es idéntica en los 3 casos, la de entrada en cambio varía muy poco entre los casos. Teniendo en cuenta el número de elementos y las pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos, optaremos por no utilizar inflation en esta zona. De este resultado y teniendo en cuenta la baja presión interna (muy poca masa en el interior) podemos concluir que el mallado de la zona de vacío es poco relevante en la transmisión de radiación.

- Tamaños de celda (Sizing)

No obstante, es evidente que cuando nos vamos acercando a una malla más simple, perdemos resolución en la localización de la incidencia de los rayos solares, provocando que se propaguen valores medios en regiones más extensas. Para asegurarnos de que esto no ocurra y a partir de los resultados obtenidos en el mallado anterior (tubo agua), propondremos un mallado tal que la relación sea 2:1, es decir, dos celdas de vacío por cada celda de agua. La relación será la siguiente:

**Tabla 6.2.5-2 Comparación elementos contacto tubo interior-zona de vacío**

Superficie	Tamaño longitudinal	Divisiones circunferencias	Elementos superficie
Exterior tubo interior	20	20	1720
Interior tubo de vacío	20	40	3040

Por lo tanto, una vez asumida esta relación, compararemos los resultados con la malla obtenida previamente:

**Tabla 6.2.5-3 Resultados pruebas sizing tubo de vacío**

Caso	Tamaño longitudinal	Divisiones circunferencias	Elementos	Temp. Sup. Entrada(K)	Temp. media sup. Salida (°K)
Inicial	10	32	9664	322,72	298,17
Segundo	20	40	6080	322,59	298,17

Vemos que los resultados son completamente iguales, confirmando lo comentado anteriormente respecto a la transmisión de la radiación en la zona de vacío. Todo y con eso, mantendremos el número de nodos actual teniendo en cuenta que la malla sería demasiado burda y desdibujaría la radiación incidente en el tubo.

## 6.3 Interior de la fachada

Queda por estudiar la parte más importante de la fachada, la cavidad interior. Esta zona envuelve los tubos anteriormente estudiados y delimita el conjunto completo. A partir de las superficies, podemos diferenciar:

1. Cristal exterior (+Z).
2. Cristal Interior (-Z).
3. Cortes Superior e Inferior (Y).
4. Límites laterales (X).
5. Contacto Tubo de vacío.
6. Colector.

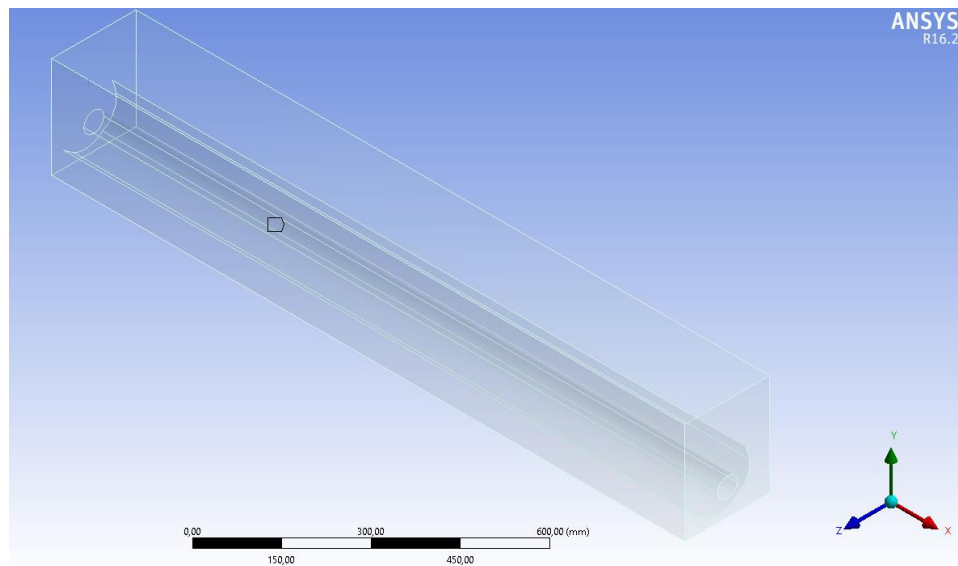


Figura 6.2.5-1 Interior de la fachada (Ansys Meshing)

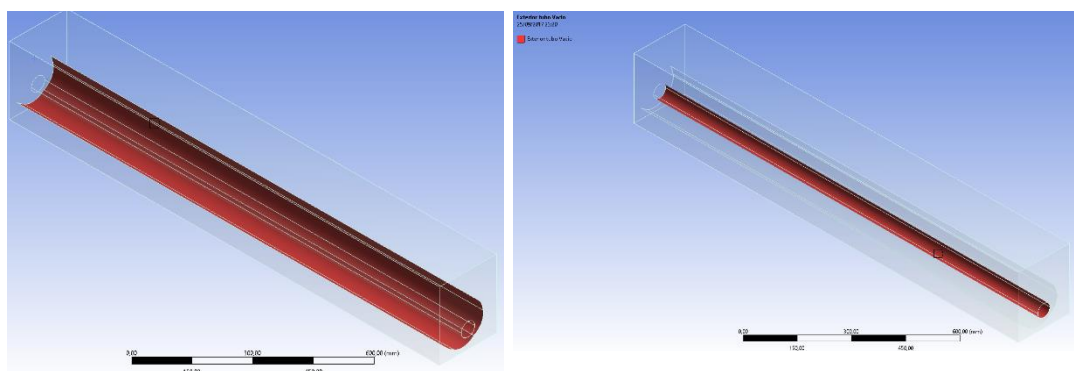


Figura 6.2.5-2 Reflector y Contacto con zona vacío (Ansys Meshing)

### 6.3.1. Cálculos previos

Al calentarse las superficies interiores de la fachada (incluidos cristales) se crean cambios en la densidad del nitrógeno (gas ideal incompresible) provocando corrientes de fluido por efecto de la flotabilidad. Necesitaremos entonces caracterizar dicha convección. Utilizaremos la guía de Ansys Fluent para convección natural(referencia). A continuación, los datos resumidos:

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura fluido	25	°C
Densidad	1,153	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad dinámica	1,775e-5	Ns/m <sup>2</sup>
Viscosidad cinemática	1,539e-5	m <sup>2</sup> /s
Calor específico	1,0408	J/KgK
Conductividad térmica	0,026	W/mK
Coefficiente dilatación	3,354e-3	°C <sup>-1</sup>
Temperatura Pared	50	°C
Longitud característica	0,2	m

Mediante las ecuaciones 4.4.3-5, 4.4.3-6 y 4.4.3-7 tenemos:

- $$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \frac{1,775 \cdot 10^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2} \cdot 1,0408 \frac{J}{KgK}}{0,026 \frac{W}{mK}} = 7,1 \cdot 10^{-4}$$
- $$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 3,354 \cdot 10^{-3} °C^{-1} (50°C - 25°C) (0,2m)^3}{\left(1,539 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2} = 2,776 \cdot 10^6$$
- $$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = 2,776 \cdot 10^6 \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 1,97 \cdot 10^3$$

Vemos que  $Ra_L < 10^6$ , por lo tanto, tendremos un caso con convección natural.

### 6.3.2. Proceso de mallado

El mallado de esta zona es más complejo que los casos anteriores. El hecho de modelar el reflector como una superficie interior “flotando” dentro del volumen condiciona la estrategia a seguir. Como solución, proponemos un mallado por tetraedros. Para favorecer la correcta propagación de los fenómenos térmicos, incluiremos capas (inflation) tanto en los cristales como en el reflector y el contacto con el tubo interior. Además, para aumentar la homogeneidad en los elementos generados, definiremos divisiones regulares en todas las superficies (Face meshing) y las controlaremos con el tamaño de las aristas de cada celda en los vértices de dichas superficies (Edge Sizing).

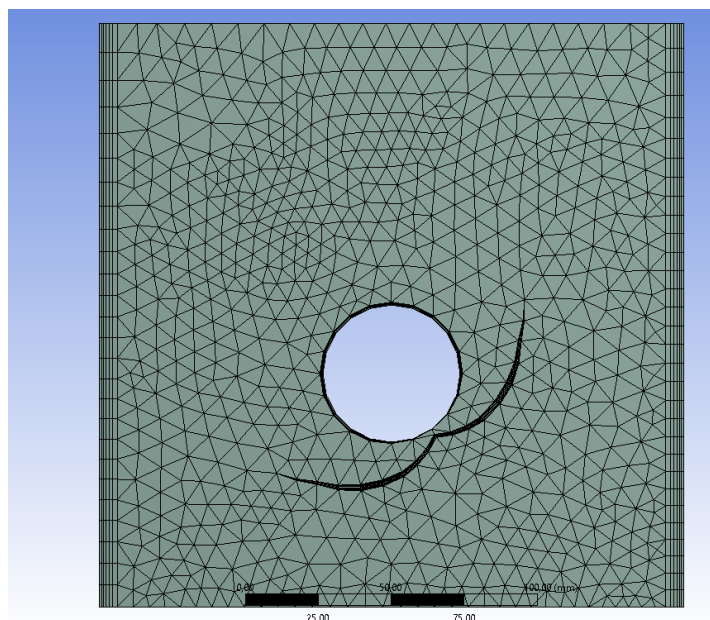


Figura 6.3.2-1 Mallado lateral del Interior de la fachada (Ansys Meshing)

**Tabla 6.3.2-1 Mallado interior de la fachada**

Operación	Objetivo	Tipo	Valor	Unidades
Method: Patch conforming method	Volumen	Tetraedros		
Inflation	Cristales	Altura primera capa	1	mm
		Numero de capas	4	#
		Factor crecimiento	1	
	Tubo Vacío y Reflector	Altura primera capa	0,25	mm
		Numero de capas	4	#
		Factor crecimiento	1,1	
Edge Sizing	Aristas interiores	Tamaño elemento	40	mm
	Aristas Exteriores	Tamaño elemento	50	mm
	Circunferencias tubo vacío	Número de divisiones	10	#
Estadísticas	Nodos		322334	#
	Elementos		1462405	#

### 6.3.3. Simulación

El primer paso de la simulación es definir que ecuaciones y modelos van a intervenir. Nos interesa estudiar cómo se propaga la radiación a través de la zona interior y como afectan los flujos de calor al nitrógeno. Por lo tanto, será necesario activar: ecuación de energía, flujo laminar y modelo de carga solar P1. Para ver los efectos de flotabilidad, tendremos en cuenta la fuerza de la gravedad. Además, deberemos definir una de las condiciones de operación del sistema, la densidad, suponiendo el nitrógeno a 25°C y presión atmosférica.

**Tabla 6.3.3-1 Modelos interior de la fachada**

Ecuación energía	Activada	
Modelo viscosidad	Laminar	
Modelo Radiación	P1	Rastreo rayos solares
	Carga Solar	Calculadora Solar
General	Gravedad	-9,81 m/s <sup>2</sup> (eje z)
Condiciones de operación	Densidad	1, 153 Kg/m <sup>3</sup>

- Propiedades del fluido

Aprovecharemos la biblioteca de Ansys para definir las propiedades del nitrógeno interior. Supondremos una temperatura inicial de 25 °C.

**Tabla 6.3.3-2 Propiedades nitrógeno**

Densidad	Constantes (Biblioteca Ansys Fluent)
Calor específico	
Conductividad Térmica	
Viscosidad	
Temperatura	25°C

- Calculadora solar

Como podemos ver el modelo de radiación incluye una calculadora solar que nos va a permitir definir las diferentes condiciones del mismo. La localización será Barcelona, escogeremos un día de verano con elevada radiación solar y orientaremos el sol respecto la malla con la superficie longitudinal hacia el sur y la lateral al este:

**Tabla 6.3.3-3 Calculadora Solar**

Obtenido de la Calculadora	Vector dirección Solar		
	Radiación Directa		
	Radiación Difusa		
Posición global	Longitud	2.1769°	
	Latitud	41.3825°	
	Zona Horaria	UTC/GMT+02:00	
Fecha	Día	21	
	Mes	Junio	
	Hora	12:00	
Orientación Malla	Norte	(0,0,-1)	(x,y,z)
	Este	(1,0,0)	(x,y,z)
Método Irradiación	Máxima radiación teórica		

- Condiciones de contorno



Nuestra malla representa una sección de la fachada. El cristal exterior, se ve afectado por la radiación y por la convección con el aire exterior. Al mismo tiempo, el cristal estará afectado por la temperatura en el interior del edificio. Por lo tanto, será necesario definir tanto las propiedades ópticas de los cristales como los coeficientes convectivos. Teniendo en cuenta que parte de la radiación será absorbida por el tubo, supondremos éste como una superficie opaca.

**Tabla 6.3.3-4 Condiciones de contorno interior de la fachada**

Superficie contorno	Tipo	Condiciones térmicas	Parámetro	Valor	Unidades
Cristal exterior (entrada)	Wall	Mezcla: Radiación + Convección	Coef. Transferencia Externa	12	W/m <sup>2</sup> K
			Temperatura exterior	25	°C
			Temperatura radiación	70	°C
			Emisividad Interna	0,11	
			Emisividad Externa	0,89	
		Radiación(P1)	Tipo Superficie	Semi-transparente	
			Transmisividad	0,78	
			Absortividad	0,15	
			Participa radiación solar	Si	
Cristal interior (salida)	Wall	Mezcla: Radiación + Convección	Coef. Transferencia Externa	8	W/m <sup>2</sup> K
			Temperatura exterior	25	°C
			Temperatura radiación	25	°C
			Emisividad Interna	0,89	
			Emisividad Externa	0,05	
		Radiación(P1)	Tipo Superficie	Semi-transparente	
			Transmisividad	0,35	
			Absortividad	0,15	
			Participa radiación solar	Si	
Tubo	Wall	Radiación(P1)	Tipo Superficie	Opaca	
			Absortividad	1	
			Participa radiación solar	Si	
Cara inferior	Pressure Inlet	-	Presión	0	Pa
			Temperatura Backflow	25	°C
Cara superior	Pressure Outlet	-	Presión	0	Pa
			Temperatura Backflow	25	°C
Laterales	Wall	Simetría			
Colector	Wall	Coupled	Emisividad interna	1	
		Radiación(P1)	Tipo Superficie	Semi-transparente	
			Transmisividad	0,3	
			Absortividad	0,2	
			Participa radiación solar	Si	

- Residuales

Utilizaremos un monitor que evalúe la temperatura media de las superficies internas y externas. Junto con los residuales de convergencia de continuidad, energía y del modelo viscoso, estas temperaturas medias nos indicarán si la solución se ha estabilizado o son necesarias más iteraciones. Por lo tanto, no solo será necesario que los residuales converjan, sino que también la temperatura en las superficies del colector y salida (superficie interna) y el flujo total del calor en la superficie de salida deben ser constantes.

**Tabla 6.3.3-5 Residuales interior de la fachada**

Residual	Convergencia
Continuidad	10e-5
Velocidad - X	10e-5
Velocidad - Y	10e-5
Velocidad - Z	10e-5
Energía	10e-8
P1	10e-8
Temp. Media reflector	Constante
Temp. Media Salida	Constante
Flujo total calor sup. Salida	Constante

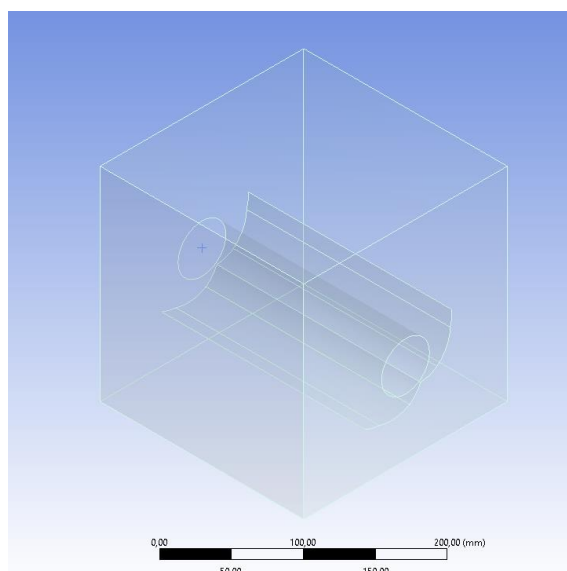
### 6.3.4. Casos de Prueba

Finalmente, comprobaremos que nuestra solución es necesaria y suficiente. Para ello, ejecutaremos la misma simulación variando los parámetros del mallado. Como la geometría es relativamente compleja, consideraremos que la aproximación inicial al mallado cerca de las superficies está suficientemente definida y nos centraremos en reducir el número total de elementos. Para ello, trabajaremos con el factor de crecimiento de malla. Este factor determina el crecimiento de los elementos a partir de los definidos en las superficies de control, es decir, el tamaño de los elementos interiores.

**Tabla 6.3.4-1 Casos factor de crecimiento interior de la fachada**

Caso	Factor de crecimiento	Nodos	Elementos
Inicial	1,05	529434	2747108
Segundo	1,20	178295	808044
Tercero	1	1525638	8460357

Como podemos ver, el número de elementos es enorme en los casos a probar. Como alternativa, planteamos reducir el tamaño del modelo ya que en este caso los resultados no dependen del eje longitudinal. Pasaremos de una longitud de 1503mm a 200 mm.



*Figura 6.3.4-1 Interior de la fachada (nitrógeno) reducido*

**Tabla 6.3.4-2 Casos factor de crecimiento interior de la fachada (módulo reducido)**

Caso	Factor de crecimiento	Elementos
Inicial	1,05	362789
Segundo	1,20	114280
Tercero	1	433814

Ahora el número de nodos es mucho menor y podemos trabajar con la malla más fácilmente. Tanto los tiempos de creación de la malla como los de las iteraciones de la simulación se ven claramente reducidos. Evaluaremos en cada caso la temperatura del reflector y del cristal interior y el flujo de calor total del cristal interior (salida).

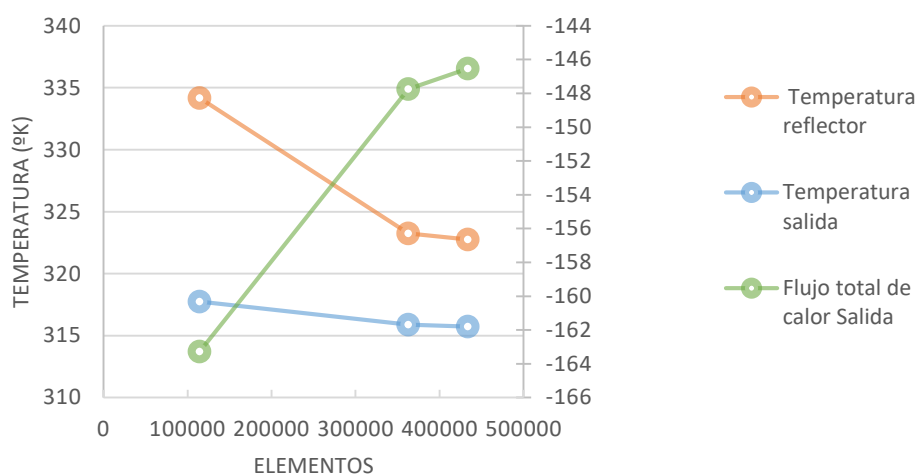
### 6.3.5. Resultados

Una vez recogidos los resultados para las tres simulaciones, podemos ver la tendencia de las variables respecto el número total de elementos:

**Tabla 6.3.5-1 Resultados factor de crecimiento interior de la fachada**

	Inicial	Segundo	Tercero
<b>Factor de crecimiento</b>	1,05	1,20	1
<b>Elementos</b>	362789	114280	433814
<b>Temperatura (°K)</b>			
<b>Reflector</b>	323,25	334,16	322,75
<b>Salida</b>	315,89	317,75	315,74
<b>Flujo total de calor</b>			
<b>Salida</b>	-147,75	-163,27	-146,53

#### Elementos vs Variables



*Figura 6.3.5-1 Gráfico elementos vs variables interior de la fachada*

En el gráfico podemos observar como todos los valores de las variables convergen al incrementar el número de elementos. La temperatura en la salida es la que se ve menos afectada y tanto la temperatura en el reflector como el flujo total de calor han prácticamente convergido. Aceptando los valores para la malla con más elementos, podemos comprobar el error al utilizar la malla inicial:

**Tabla 6.3.5-2 Errores resultados diferentes casos factor de crecimiento Interior fachada**

Valor Real	Aproximación	Error Absoluto	Error Relativo
<b>322,75</b>	323,25	0,5	0,15%
<b>315,74</b>	315,89	0,15	0,047%
<b>-146,53</b>	-147,75	1,22	0,83%

Comparando los contornos de temperaturas en un plano medio, podemos ver la propagación de temperaturas y las diferencias entre los factores de crecimiento (rojo 82 °C, azul oscuro 25°C):

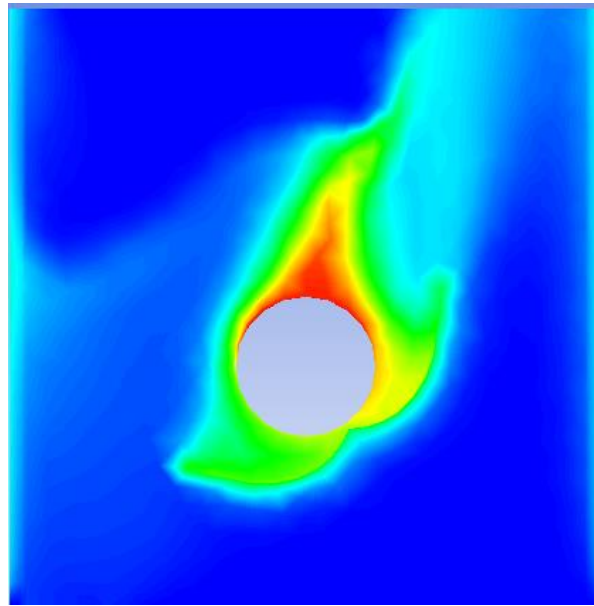


Figura 6.3.5-4 Contorno temperaturas caso inicial (FC=1,05)

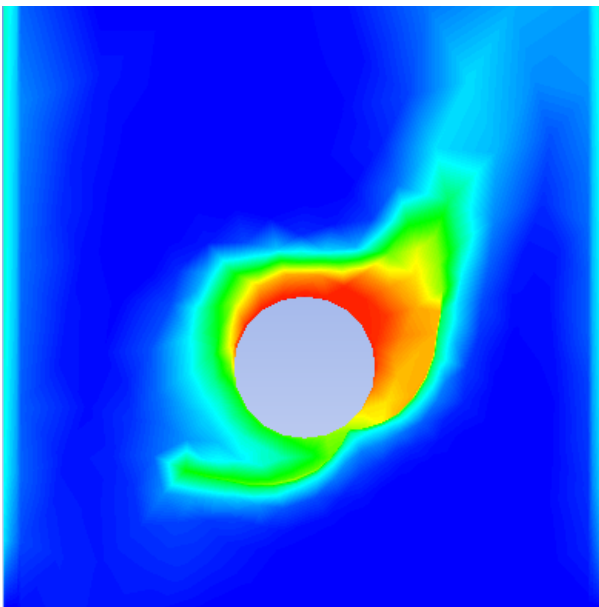


Figura 6.3.5-3 Contorno temperaturas segundo caso (FC=1,2)

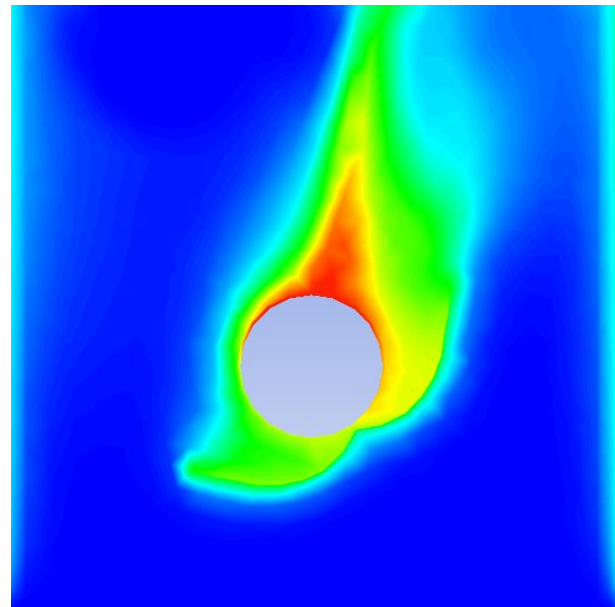


Figura 6.3.5-2 Contorno temperaturas tercer caso (FC=1)

Por lo tanto, como los errores relativos son muy bajos y la definición de los contornos de temperatura no está excesivamente degenerada consideramos el mallado inicial como correcto. Cabe decir que el gradiente de temperaturas generado alrededor del tubo es a causa de la condición de contorno definida en el mismo. El tubo de vacío proporciona una capa de aislamiento reduciendo significativamente la transferencia de calor del absorbedor hacia el exterior por lo que no nos encontraríamos con este gradiente en la simulación del mallado completo.

## 7. Resultados

A continuación, un resumen de las mallas encontradas:

- Tubo interior

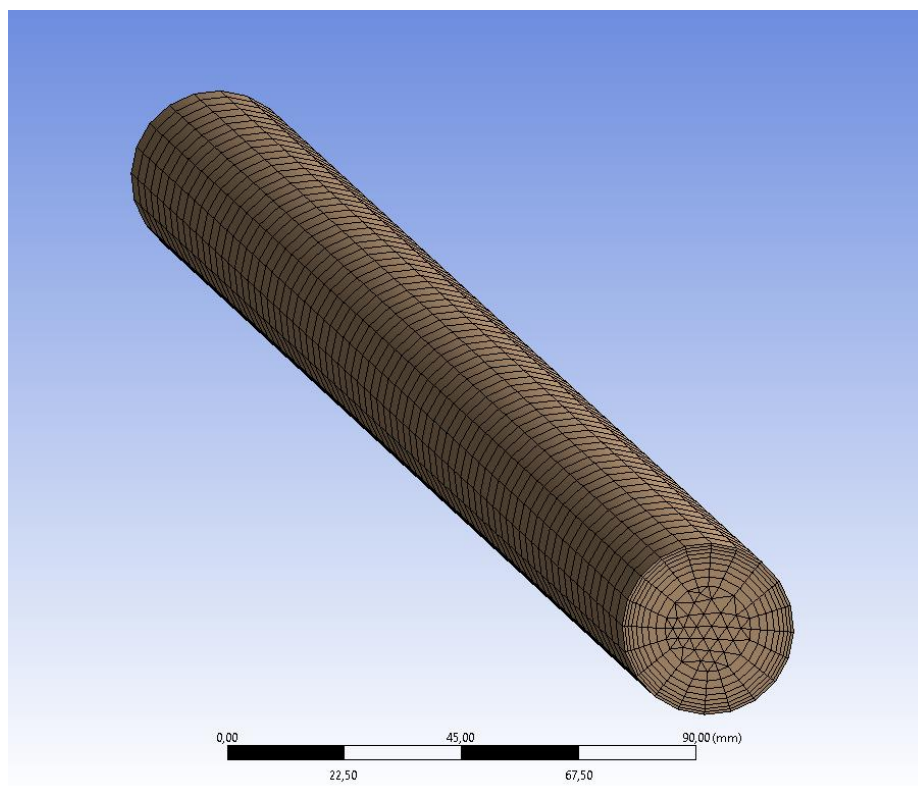


Figura 6.3.5-1 Mallado final tubo interior

**Tabla 6.3.5-1 Operaciones mallado final tubo interior**

Operación	Objetivo	Tipo	Valor	Unidades
Edge Sizing	Aristas longitudinales	Tamaño elemento	20	mm
Edge Sizing	Aristas circulares	Numero de divisiones	20	#
Inflation	Pared	Altura primera capa	0,5077	mm
		Numero de capas	8	#
		Factor crecimiento	1,2	-
Estadísticas	Nodos		15785	
	Elementos		17328	

- Tubo de vacío

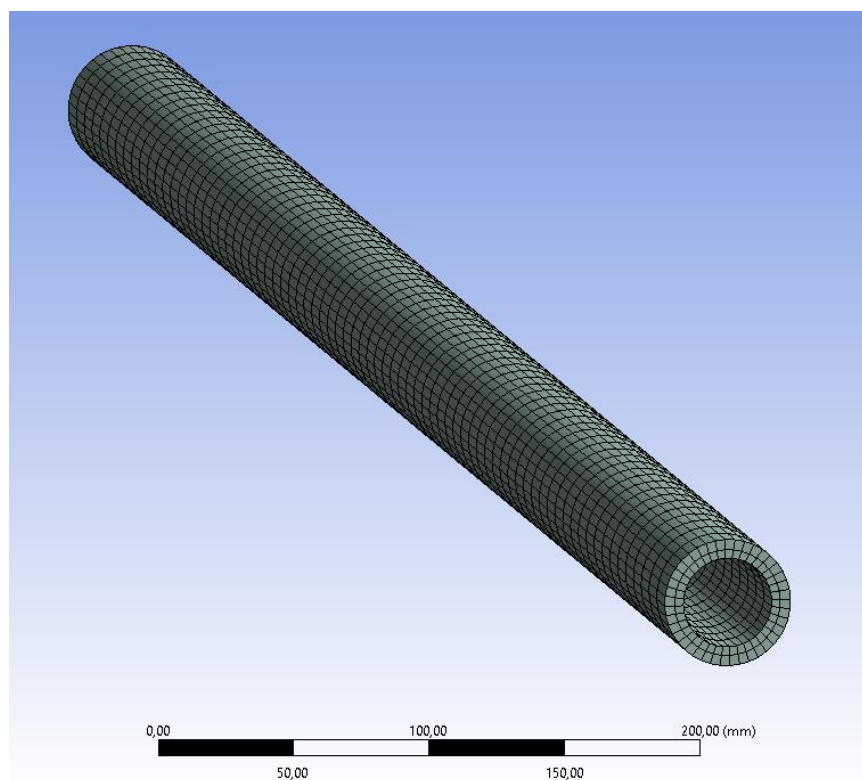


Figura 6.3.5-2 Mallado final tubo de vacío

**Tabla 6.3.5-2 Operaciones mallado final tubo de vacío**

Operación	Objetivo	Tipo	Valor	Unidades
Edge Sizing	Longitud cilindro	Tamaño elemento	20	mm
Edge Sizing	circunferencia cilindro	Numero de divisiones	40	#
Method: MultiZone	Volumen	Hexaedros		
Inflation	Sin inflation			
Estadísticas	Nodos		9240	#
	Elementos		6080	#

- Interior de la fachada

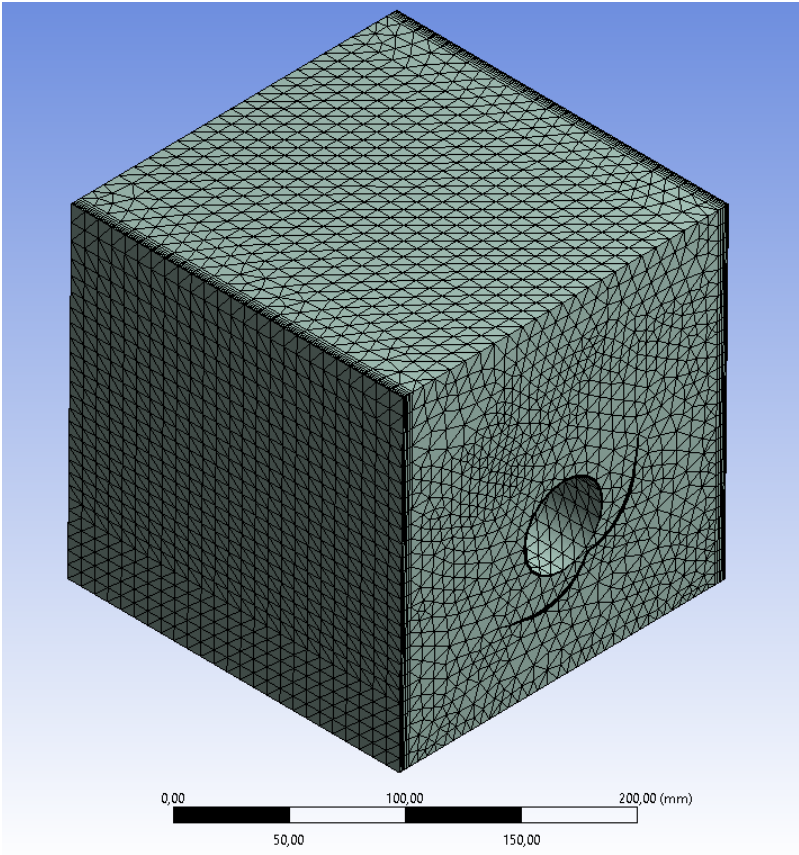


Figura 6.3.5-3 Mallado final interior de la fachada

Tabla 6.3.5-3 Operaciones mallado final interior de la fachada

Operación	Objetivo	Tipo	Valor	Unidades
Method: Patch conforming method	Volumen	Tetraedros		
Inflation	Cristales	Altura primera capa	0,6	mm
		Numero de capas	6	#
		Factor crecimiento	1,2	
	Tubo Vacío y Reflector	Altura primera capa	0,25	mm
		Numero de capas	4	#
		Factor crecimiento	1,1	
Edge Sizing	Aristas interiores	Tamaño elemento	40	mm
	Circunferencias tubo vacío	Número de divisiones	20	#
Estadísticas	Nodos		74099	#
	Elementos		362783	#



A partir de este punto, somos capaces de ejecutar una simulación de toda la fachada trasladando los resultados obtenidos a la geometría completa. En el estudio se ha tenido en cuenta el proceso de unir los tres mallados obtenidos mediante interfaces (relación entre las mallas en las superficies colindantes). Como se ha comentado anteriormente, es importante no tener una relación superior de 1:10 entre las caras de elemento pertenecientes a éstas superficies.

## 8. Análisis del impacto ambiental

Los resultados obtenidos en el estudio no permiten hacer una valoración final de los ahorros energéticos que se producirían con la implementación y uso del sistema de fachada propuesto. Todo y así, el sistema está planteado de modo que es capaz tanto de reducir la carga solar y consecuentemente las cargas de enfriamiento como de reconducir el calor absorbido para ser reaprovechado (ACS y/o calefacción) o eliminado eficientemente (torre de refrigeración). Tanto la reducción de las cargas en el sistema de climatización o en el de agua caliente sanitaria comportarían un ahorro directo en energía consumida, reduciendo los costes de operación de los mismos y por ende las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## Conclusiones

Respecto al conocimiento adquirido durante el trabajo:

- Los efectos de la radiación solar deben ser controlados en edificios con fachadas dobles acristaladas.
- Hasta la actualidad se ha desarrollado un amplio abanico de estrategias para la absorción de calor de la radiación solar.
- El mallado es uno de los factores más importantes para la simulación mediante CFD. Ser capaz de capturar los efectos de los modelos térmicos participantes es crucial.
- Utilizar número adimensionales es básico para caracterizar los fenómenos y poder tratarlos.
- La geometría completa inicialmente propuesta requeriría unos recursos computacionales imposibles de cumplir con un ordenador de sobremesa.
- El mallado del tubo interior para la convección en el flujo de agua presenta poca dependencia con el número de elementos para los casos probados (probablemente por las condiciones de simulación)
- El mallado del tubo de vacío es poco relevante en el modelo, siempre y cuando se asegure una definición suficientemente del flujo de radiación.
- Para geometrías irregulares el proceso de mallado puede volverse complicado y tedioso. La experiencia es fundamental para establecer la estrategia a seguir.

Respecto a acciones futuras:

- A partir de los resultados obtenidos somos capaces de simular el conjunto completo de la fachada y cuantificar tanto los efectos térmicos producidos en el interior como la relación entre el exterior de la fachada y el interior del edificio.
- De los resultados obtenidos del punto anterior, podríamos no solo definir la aplicabilidad del diseño si no también realizar mejoras para que sea provechoso.

## Presupuesto

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el presente estudio, no podemos realizar una valoración económica del diseño. Cuantificaremos entonces el valor aportado por el estudiante. A continuación, el coste supuesto asociado al estudio:

Actividad		Tiempo dedicado (horas)	Coste asociado (€/hora)	Coste actividad (€)
Iniciación Ansys Fluent®		100	10	1000
Estudio previo diseño		150	15	2250
Geometría (Solidworks®)		10	20	200
Estudio Independencia	Ansys Meshing®	140	20	6000
	Ansys Fluent®	160		
Redacción de la memoria		120	10	1200
TOTAL		680		10650

## Bibliografía

- [1] <http://www.upc.edu/web/catedraupc/jg/catedra.html>
- [2] <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
- [3] Eva Cuerva Contreras, "OPTIMIZACIÓN TÉRMICA Y ENERGÉTICA DE LA DOBLE FACHADA ACRISTALADA CON VENTILACIÓN MECÁNICA EN CLIMA MEDITERRÁNEO" Tesis Doctoral, ETSEIB (UPC), Barcelona, 2013.
- [4] Jordi Parra Porcar, "THERMO-FLUID DYNAMICS OPTIMIZATION WITH CFD" Trabajo final de grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona (Spain), 2015.
- [5] <http://www.wbdg.org/resources/managing-enclosure-heat-flows>
- [6] Soteris A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications", Progress in Energy and Combustion Science 30, 2004.
- [7] Yong Kim, Taebeom Seo, "Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube", Renewable Energy 32, 2007.
- [8] <http://www.linuo-ritter-international.com/es/preguntas-frecuentes/colectores-de-tubos-de-vacio/>
- [9] ANSYS, INC., "ANSYS Fluent Theory Guide" November, 2013.
- [10] Mahmut Sami Buker, Saffa B. Riffat, "Building integrated solar thermal collectors – A review" Renewable and Sustainable Energy Reviews 51, 2015.
- [11] Prof. Stefan Behling, "SOLAR THERMAL TUBES IN THE FAÇADE - CPC Office/System Wicono" Institute for Building construction and Design, University of Stuttgart.
- [12] Anthony Raúl Ravello, "USO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN DFA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGAS DE ENFRIAMIENTO" Trabajo final de grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona (Spain), 2017.
- [13] <http://himinsun.com/2-1-glass-evacuated-tube.html>
- [14] ANSYS, INC., "ANSYS Fluent User Guide" November, 2013.
- [15] Sergi Jiménez García, "EVALUACION DE SISTEMAS DE ELIMINACION DE CALOR RADIATIVO EN DOBLES FACHADAS ACRISTALADAS" Trabajo final de grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona (Spain), 2017.
- [16] Abel Velasco Vilanova, "DOUBLE-SKIN FAÇADE CFD SIMULATION" Trabajo final de grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona (Spain), 2017.
- [17] D. Faggembauu, "Heat transfer and fluid-dynamics in double and single skin façades" Ph.D. thesis. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona (Spain), 2006.

## Anexos

### Anexo A - Obtención del ángulo de inclinación

Para el cálculo de la radiación incidente en nuestro sistema, utilizaremos el “Atlas de Radiació Solar a Catalunya”. Teniendo en cuenta que la fachada se sitúa en Barcelona y que estará orientada en dirección sur (Orientación 0°), obtenemos la siguiente tabla:

Radiació solar global diària sobre superfícies inclinades (MJ/m<sup>2</sup>/dia). Estació: Barcelona

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	7,70	10,56	14,72	19,15	22,58	24,21	23,63	20,93	16,85	12,32	8,66	6,94	15,71
10°	8,56	11,41	15,47	19,67	22,78	24,25	23,74	21,31	17,54	13,17	9,55	7,80	16,29
15°	9,37	12,19	16,14	20,07	22,84	24,13	23,70	21,59	18,13	13,95	10,38	8,61	16,78
20°	10,12	12,90	16,70	20,35	22,76	23,87	23,52	21,76	18,61	14,63	11,15	9,37	17,17
25°	10,81	13,52	17,17	20,51	22,60	23,48	23,24	21,80	18,98	15,23	11,85	10,07	17,46
30°	11,43	14,07	17,52	20,54	22,32	23,02	22,86	21,71	19,23	15,73	12,47	10,71	17,65
35°	11,97	14,52	17,77	20,45	21,90	22,43	22,34	21,48	19,36	16,13	13,01	11,28	17,73
40°	12,44	14,88	17,91	20,23	21,35	21,70	21,69	21,12	19,37	16,43	13,47	11,77	17,71
45°	12,83	15,15	17,94	19,89	20,67	20,84	20,90	20,63	19,26	16,63	13,85	12,19	17,58
50°	13,14	15,32	17,86	19,43	19,87	19,86	20,00	20,02	19,03	16,72	14,13	12,53	17,33
55°	13,36	15,40	17,67	18,85	18,95	18,77	18,97	19,29	18,68	16,71	14,32	12,78	16,98
60°	13,49	15,37	17,36	18,16	17,92	17,60	17,84	18,44	18,22	16,59	14,42	12,95	16,53
65°	13,53	15,25	16,95	17,36	16,83	16,41	16,71	17,48	17,65	16,36	14,42	13,04	16,00
70°	13,49	15,03	16,44	16,46	15,70	15,14	15,48	16,43	16,97	16,03	14,33	13,03	15,38
75°	13,35	14,72	15,83	15,47	14,48	13,78	14,18	15,35	16,19	15,60	14,14	12,94	14,67
80°	13,13	14,31	15,12	14,41	13,18	12,36	12,80	14,17	15,31	15,08	13,86	12,77	13,87
85°	12,82	13,81	14,32	13,29	11,82	10,93	11,35	12,93	14,34	14,45	13,50	12,51	13,00
90°	12,43	13,23	13,44	12,11	10,41	9,57	9,99	11,62	13,30	13,74	13,04	12,16	12,08

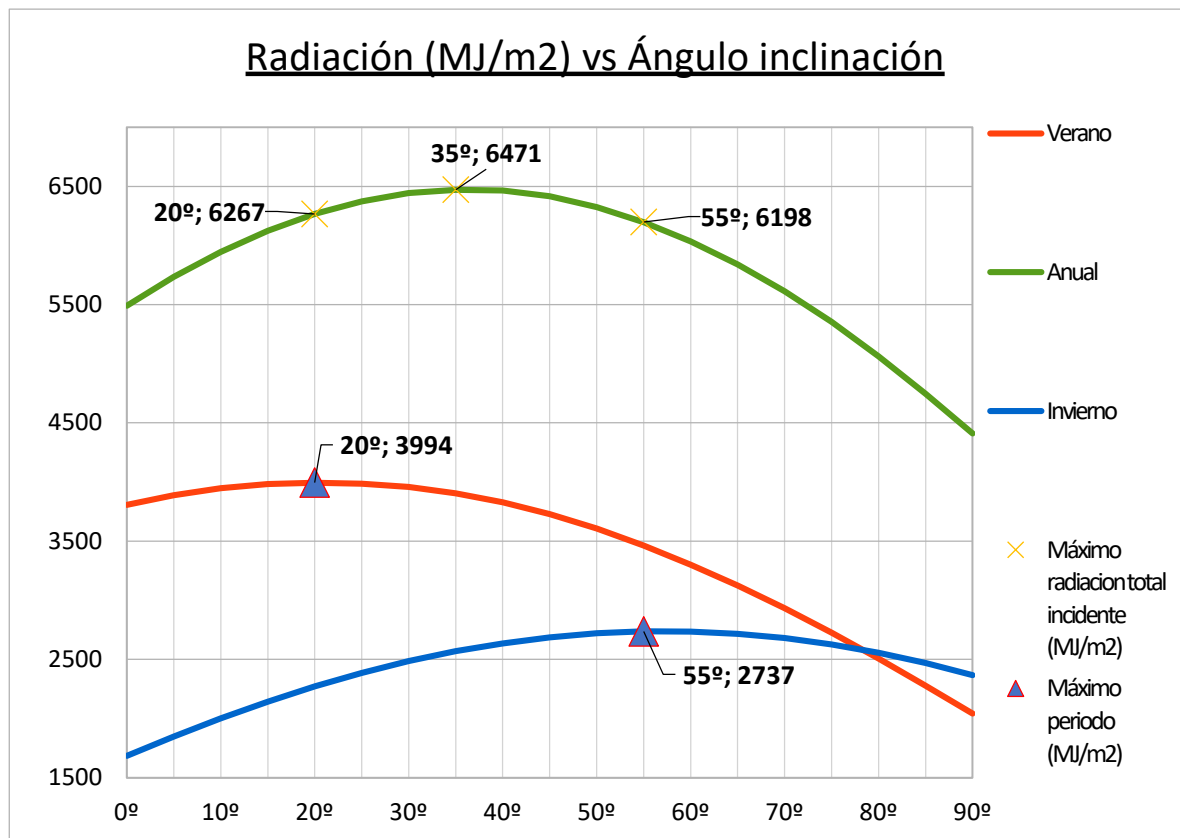
Tabla radiación global diaria Barcelona

Dicha tabla, nos muestra la radiación global diaria incidente para cada inclinación. Como en nuestro estudio queremos diferenciar entre verano e invierno, buscaremos el ángulo óptimo para los dos periodos (abril-setiembre y setiembre-marzo respectivamente). Éste, será el valor para el cual la radiación global total incidente en el periodo sea máximo. Como ejemplo, el cálculo para el periodo de verano:

$$E_{D,Verano} = \sum_{Abril}^{Septiembre} Radiación\ Mensual_i \cdot Dias\ Mes$$

*Ecuación Radiación total por periodo*

Para ambos periodos y para todo el año, obtenemos la siguiente gráfica según el ángulo de inclinación.



Gráfica radiación solar Barcelona, orientación 0°

Como nos interesa maximizar la radiación incidente en el periodo de verano (cargas solares son mayores) Consideraremos el ángulo para el periodo de verano. No obstante, como se ha comentado anteriormente en este trabajo, esta inclinación podría ser fácilmente modificada a lo largo del año con un simple sistema mecánico.

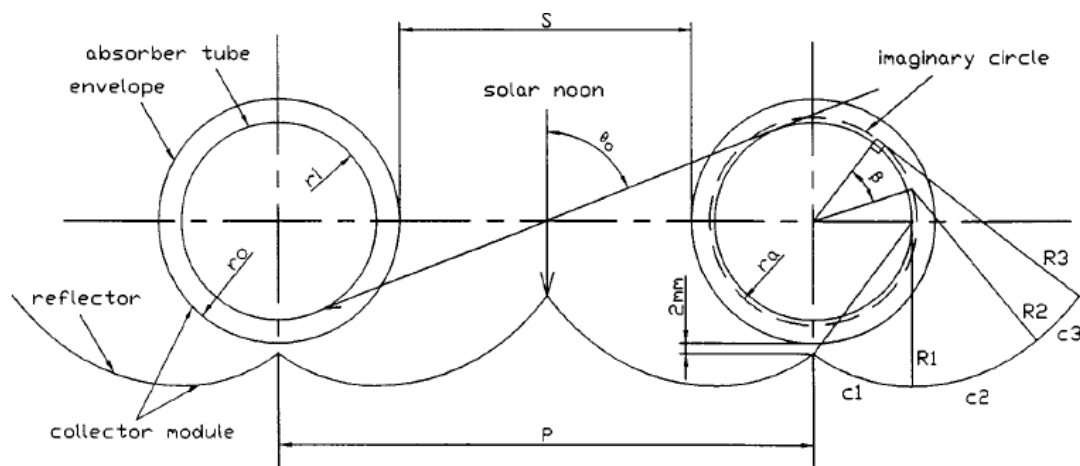
**Tabla resultados análisis radiación**

Periodo	Verano	Invierno	Anual
Radiación total Anual	6265,26	6199,43	6473,03
Angulo (respecto vertical)	20º	55º	35º

## Anexo B – Geometría del Reflector

El objetivo del reflector es doble. Principalmente debe ser capaz de concentrar la radiación en el tubo captador aumentando así su área efectiva de captación, pero también debe ser capaz de dejar pasar la suficiente luz natural para no alterar las condiciones de luminosidad del interior del edificio. Por ello, es importante maximizar el ratio de concentración para aprovechar toda la radiación posible.

El principio para generar la geometría del reflector es la evolvente del tubo. Nos basaremos en el diseño realizado por C. J. Zhao, K. Kanayama y H. Baba, descrito en el artículo publicado “Compound Circular Reflector of a Novel Design for Evacuated Tubular Collectors” Japón, 2002.



Reflector circular compuesto (fuente: Compound Circular Reflector of a Novel Design for Evacuated Tubular Collectors)

Donde en nuestro modelo:

Parámetro	Ro (mm)	Ri(mm)	Ra(mm)	$\beta$ (rad)
Valor	23,5	16,5	17,5	0.6

Calcularemos a continuación el resto de parámetros según las ecuaciones descritas:

- $R_1 = \{r_i^2 + (r_o + 2)^2\}^{0,5} = 30,37 \text{ mm}$
- $R_2 = R_1 + (r_a^2 - r_i^2)^{0,5} = 36,2 \text{ mm}$
- $R_3 = R_2 + 2r_a \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = 46,54 \text{ mm}$

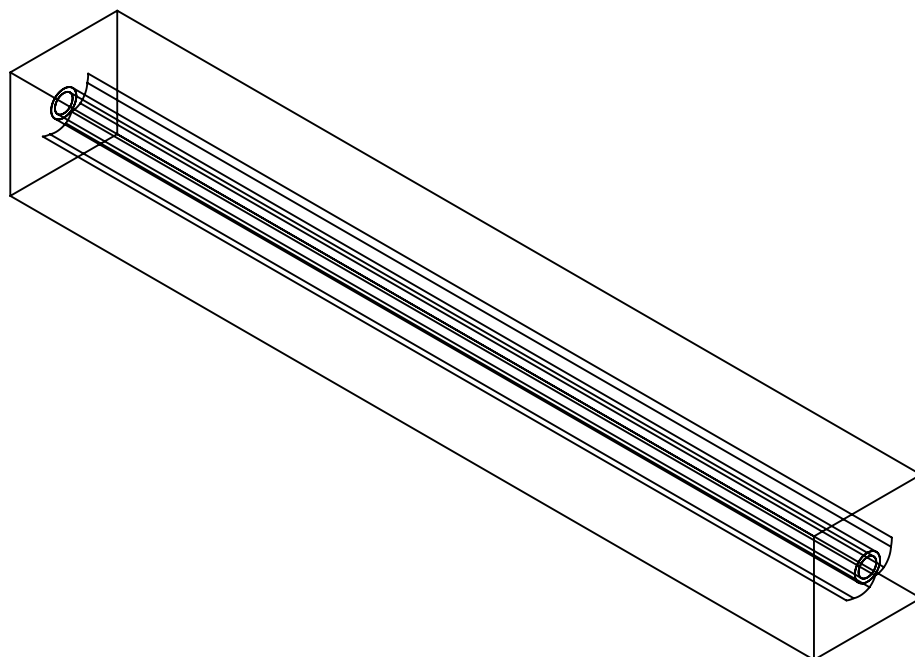
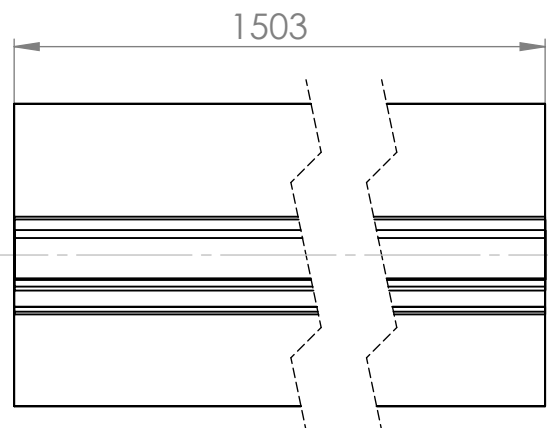
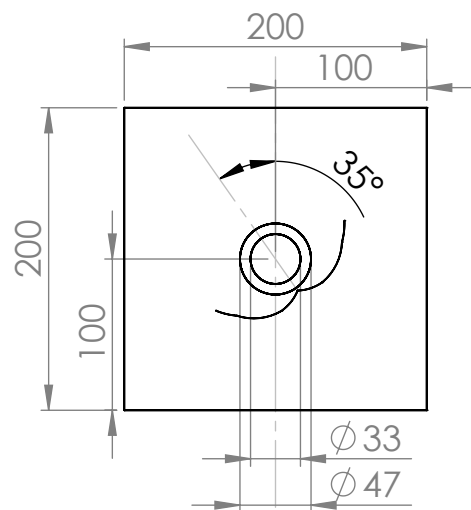
Parámetro	R1(mm)	R2(mm)	R3(mm)
Valor	30,37	36,2	46,54




## **Planos**

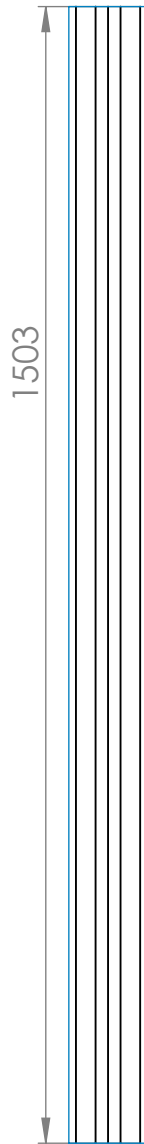
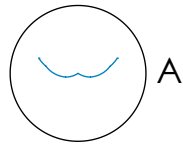
**Plano del módulo (pág.72)**

**Plano del reflector (pág.73)**



ESCALA 1 : 10

Título: <b>Colector unitario</b>		Nombre del dibujo: <b>colector unitario</b>		A4
Dibujado por: Ruben Gómez Freijo	Fecha: 3/10/2017	 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</b> <b>Escola d'Enginyeria de Barcelona Est</b>		
Comprovado por:	Fecha:			
Estudio de eficiencia térmica sobre fachadas de edificios en climas mediterráneos mediante dinámica de fluidos computacional		Escola d' Enginyeria de Barcelona Est EEBE (UPC)		
		ESCALA:1:5	HOJA 1 de 2	



DETALLE A  
ESCALA 1 : 2

Título:

**Colector unitario**

Nombre del dibujo:

**reflector**

A4

Dibujado por: Ruben Gómez Freijo

Fecha: 3/10/2017

Comprovado por:

Fecha:



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola d'Enginyeria de Barcelona Est**

Estudio de eficiencia térmica sobre fachadas de edificios en climas mediterráneos mediante dinámica de fluidos computacional

Escola d' Enginyeria de Barcelona Est EEBE (UPC)

ESCALA:1:10

HOJA 2 de 2